

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA TEXTILNÍ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Liberec 2011**

**Iva Plešková**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**



Studijní program: B3107 Textil

Studijní obor: Textilní marketing

**Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů  
s krátkovlákným čedičem**

**Mechanical properties of composite materials with  
short fibres basalt**

Iva Plešková

**779**

**Vedoucí bakalářské práce:** Ing. Miroslava Maršálková, Ph.D.

**Rozsah práce:**

Počet stran: 66

Počet obrázků: 47

Počet tabulek: 10

Počet příloh: 1 - přílohy jsou pro jejich obsáhlost umístěny na přiloženém CD

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta textilní  
Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Iva PLEŠKOVÁ**  
Osobní číslo: **T08000412**  
Studijní program: **B3107 Textil**  
Studijní obor: **Textilní marketing**  
Název tématu: **Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů  
s krátkovlákněným čedičem**  
Zadávací katedra: **Katedra hodnocení textilií**

### **Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :**

1. Vypracujte literární rešerši na téma: mechanické vlastnosti materiálů, statický 3bodý ohyb, kompozitní materiály, výroba a vlastnosti čedičových vláken.
2. Vytvořte kompozity s využitím krátkovlákněného čediče.
3. Navrhněte a realizujte experiment mechanických testů kompozitů a matrice bez výztuže.
4. Naměřené mechanické vlastnosti kompozit a matrice vyhodnoťte a porovnejte.

Rozsah grafických prací:  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**R.A. Bareš: Kompozitní materiály, SNTL Praha 1988**  
**Agarwal, B.D., Broutman, L.J.: Vláknové kompozity, SNTL Praha 1987**  
**Lehner, J.: Skleněná, horninová a strusková vlákna, SNTL Praha 1960**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miroslava Maršálková, Ph.D.**  
Katedra textilních materiálů

Datum zadání bakalářské práce: **30. října 2010**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. května 2011**

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená *diplomová (bakalářská)* práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním *diplomové (bakalářské)* práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou diplomovou (*bakalářskou*) práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové (*bakalářské*) práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové (*bakalářské*) práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové (*bakalářské*) práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci dne 21. prosince 2010

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Touto cestou bych chtěla poděkovat vedoucí mé bakalářské práce Ing. Miroslavě Maršálkové, Ph.D. za pomoc a odborné vedení při řešení bakalářské práce.

V neposlední řadě patří velký dík mé rodině a blízkým, kteří mě podporovali po celou dobu studia na vysoké škole.

# ANOTACE

Bakalářská práce s názvem Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s krátkovlákněným čedičem je rozdělena do tří částí. První část se zabývá obecnou charakteristikou vlastností kompozitních materiálů. Poté je zde popsána výroba, použití a vlastnosti čedičových vláken, ale také Lukosil M 130, který tvořil matrici.

Druhá část, experimentální, se zabývá výrobou vzorků z Lukosilu M 130 a kompozitů tak, že odpadový materiál je smíchán spolu s Lukosilem M 130 a z výsledného materiálu jsou připraveny vzorky o různých tloušťkách. Následně jsou popsány zkoušky a přístroje, které byly použity pro testování kompozitů a vzorků z Lukosilu M 130.

Poslední část se zabývá diskuzí výsledků. Obsahuje slovní a grafické vyjádření dosažení výsledků testů a jejich shrnutí.

# ANNOTATION

This bachelor thesis called Mechanical attributes of composite materials with short-fiber basalt is divided into three parts. The first part deals with general characteristic of composite materials. Then the production, usage and attributes of basalt fibers are being described, as well as Lukosil M 130, which creates matrix.

The second part, experimental one, deals with Lukosil M 130 and composite samples production so that waste material is mixed with Lukosil M 130 and samples of various thicknesses are prepared. Tests and tools used for testing composites and samples from Lukosil M 130 are then described.

The last part focuses on discussing on findings. It contains word and graphic references of obtained results and their summarization.

## **Klíčová slova**

- kompozitní materiály
- výztuž
- matrice
- čedičová vlákna
- Lukosil M 130
- mechanické vlastnosti

## **Key words**

- composite materials
- reinforcement
- matrix
- basalt fiber
- Lukosil M 130
- mechanical properties



## Seznam použitých zkratk a symbolů

$b$	šířka vzorku	[mm]
$E$	modul pružnosti v ohybu	[N/mm <sup>2</sup> ]
$F$	síla	[N]
$F_m$	maximální dosažená síla	[N]
$F_x$	síla odpovídající posunu	[N]
$h$	tloušťka vzorku	[mm]
$l$	délka vzorku	[mm]
$L$	rozpětí podpěr	[mm]
$t$	teplota	[°C]
$X$	průhyb	[mm]
$\rho_v$	objemová měrná hmotnost	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	napětí v ohybu	[Mpa]

## Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>12</b>
<b>2. Teoretická část .....</b>	<b>13</b>
2.1. Kompozitní materiály .....	13
2.1.1. Synergický efekt .....	14
2.1.2. Klasifikace kompozitů .....	15
2.1.2.1. Klasifikace kompozitů dle druhu výztuže .....	15
2.1.2.2. Klasifikace kompozitů dle druhu matrice .....	16
2.1.3. Textilní vlákna pro kompozity .....	16
2.1.4. Vlákenné produkty pro textilní výztuže .....	17
2.1.5. Vlastnosti vláknových kompozitů .....	17
2.1.6. Použití kompozitů .....	18
2.2. Čedič .....	19
2.2.1. Složení čediče .....	19
2.2.2. Čedičová vlákna .....	20
2.2.2.1. Výroba čedičových vláken .....	21
2.2.2.1.1. Výroba kontinuálních čedičových vláken .....	21
2.2.2.1.2. Výroba krátkých čedičových vláken .....	22
2.2.2.2. Vlastnosti čedičových vláken .....	23
2.2.2.3. Použití čedičových vláken .....	25
2.2.2.3.1. Příklady uplatnění .....	25
2.2.2.4. Vliv čedičových vláken na zdraví .....	26
2.2.2.5. Ekologické přednosti čedičových vláken .....	26
2.3. Metylsilikonový lak Lukosil M 130 .....	27
2.3.1. Použití Lukosilu M 130 .....	28
<b>3. Experimentální část .....</b>	<b>29</b>
3.1. Výroba vzorků .....	29
3.1.1. Potřebný materiál a pomůcky .....	29

3.1.2. Postup výroby kompozitních vzorků .....	31
3.1.3. Příprava kompozitních vzorků pro měření .....	33
3.1.4. Postup výroby vzorků z Lukosilu M 130 .....	34
3.1.4.1. Výroba vzorků pomocí kovové formy .....	34
3.1.4.2. Výroba vzorků pomocí skleněných destiček .....	35
3.1.4.3. Výroba vzorků pomocí formy z hliníkové folie.....	35
3.2. Testování vzorků .....	37
3.2.1. Zkouška 3 – point bending pomocí dynamometru .....	37
3.2.1.1. Postup zkoušky .....	37
3.3. Diskuze výsledků.....	40
3.3.1. Objemová měrná hmotnost kompozitních vzorků.....	40
3.3.2. Zkouška kompozitních vzorků 3 - point bending na dynamometru .....	41
3.3.3. Objemová měrná hmotnost Lukosilu M 130 .....	46
3.3.4. Zkouška vzorků z Lukosilu M 130 3 - point bending na dynamometru .....	46
3.3.5. Porovnání vlastností kompozitních vzorků se vzorky z Lukosilu M 130 ....	50
3.3.6. Porovnání mechanických vlastností kompozitů a Lukosilu M 130 s vlastnostmi oceli.....	53
3.4. Detailní pohled na lom vzorků.....	57
3.4.1. Kompozitní vzorky .....	57
3.4.2. Vzorky z Lukosilu M130.....	60
<b>4. Závěr .....</b>	<b>62</b>
<b>5. Doporučená literatura .....</b>	<b>64</b>
<b>6. Seznam příloh.....</b>	<b>66</b>

## 1. Úvod

Kompozitní materiály získávají stále větší uplatnění v průmyslu. Používají se všude, kde je zapotřebí výborných mechanických vlastností. Nepřehlédnutelnou výhodou kompozitních materiálů je jejich několika násobně nižší hmotnost oproti jiným materiálům se zachováním dobrých mechanických vlastností. Kompozitní materiály jsou z hlediska průmyslu jednou z nejperspektivnějších a nejrychleji rostoucích odvětví, a proto je důležité získávat o nich stále nové informace a tím pomáhat jejich vývoji.

Nároky odběratelů na fyzikální, chemické a tepelně odolné technické materiály se stále zvyšují, proto je zapotřebí se této oblasti také věnovat. Velkou část této oblasti dokážou uspokojit čedičová vlákna díky své fyzikální, chemické a tepelné stálosti. Čedičová vlákna předčí svými vlastnostmi vlákna skleněná a azbestová, které začínají úspěšně nahrazovat. Vlákna skleněná, především svojí přijatelnější cenou, a vlákna azbestová hlavně pro svou zdravotní nezávadnost, protože vlákna azbestová jsou karcinogenní.

Tato práce je rozdělena na dvě části. V teoretické části se bakalářská práce zabývá kompozitními materiály jejich vlastnostmi, výrobou a použitím. Dále se věnuje kompozitní výztuži, kterou tvoří čedičová vlákna. Je zde popisováno složení čediče, jeho zpracování, vlastnosti čedičových vláken a jejich využitelnost v praxi. Další část tvoří kompozitní matrice, kterou je Lukosil M 130. Jsou zde popsány jeho vlastnosti a využití Lukosilu M 130.

Hlavním úkolem bakalářské práce bylo vytvoření kompozitního materiálu a vzorků z Lukosilu M 130 a jejich následné testování mechanických vlastností. V této části je popsána výroba zkoušeného kompozitu a Lukosilu M 130, popis použitého přístroje na 3 – bodový ohyb, na kterém byly prováděny zkoušky. Je zde vypracován jednoduchý popis postupu měření na stroji.

V poslední části jsou uvedeny naměřené hodnoty, porovnány mezi sebou a s ocelí a znázorněny v grafech. V závěru je diskuze o výsledcích a využití zkoušeného kompozitu.

## 2. Teoretická část

### 2.1. Kompozitní materiály

Kompozity jsou heterogenní materiály složené ze dvou nebo více odlišných složek. Tyto složky mají různé chemické a mechanické vlastnosti. Kompozity jsou tvořeny maticí a výztuží. Matrice je poddajnější a spojitá složka. Výztuž je složka nespojitá. [1, 2]

Materiál lze klasifikovat jako kompozit pouze v případě pokud splňuje tyto podmínky:

- vlastnosti složek se výrazně liší
- složky jsou oddělitelné rozhraním
- výroba kompozitního materiálu spočívá v mechanickém mísení komponent
- podíl výztuže v kompozitním materiálu je větší než 5%
- výztuž je pevnější a tužší než matrice
- kombinací složek vznikají podstatně lepší vlastnosti v porovnání s vlastnostmi samostatných složek, včetně součtu všech vlastností jednotlivých složek [11, 12]

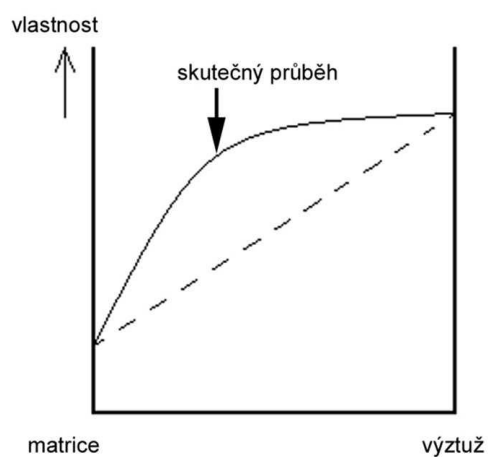
Kompozity mohou být jednovrstvé a vícevrstvé. Jednovrstvé kompozity jsou tvořeny dlouhými vlákny, která jsou orientovaná jednosměrně nebo dvousměrně. Také mohou být tvořena krátkými vlákny, které jsou nahodile orientovaná nebo orientovaná. Mezi vícevrstvé kompozity patří lamino, laminát a hybridní laminát. Vícevrstvé kompozity skládající se z materiálů, které jsou v každé vrstvě stejné, se nazývají lamináty. Hybridní laminát se skládá z vrstev, které jsou tvořeny různými materiály. Lamino je jedna vrstva vícevrstvého vláknového kompozitu. [5]



Obr. č. 2.1: Kompozitní materiál s vláknennou čedičovou výztuží [19]

### 2.1.1. Synergický efekt

Synergický efekt vzniká tím, že jednotlivé složky vzájemně spolupracují. To znamená, že alespoň jedna vlastnost kompozitu je lepší než průměr vlastností jednotlivých složek kompozitu. Tento efekt lze vysvětlit jako situaci, kdy výsledný celek vlastností je vyšší než pouhý součet vlastností jednotlivých složek. Platí tedy, že  $1+1=3$



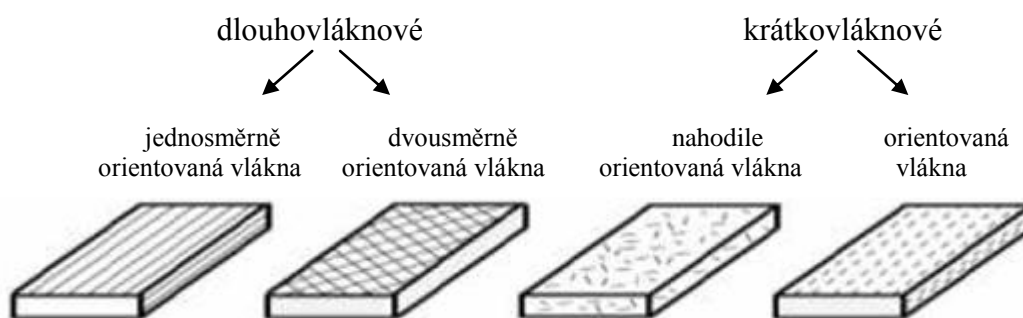
Obr. č. 2.2: Průběh synergického efektu [23]

### 2.1.2. Klasifikace kompozitů

- dle druhu výztuže
- dle druhu matrice

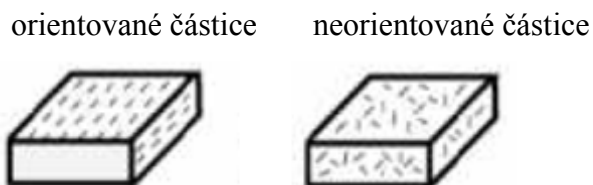
#### 2.1.2.1. Klasifikace kompozitů dle druhu výztuže

- vláknové výztuže - jeden rozměr výztuže je výrazně větší, než dva zbývající. Vláknové výztuže dělíme na kompozity s krátkými vlákny a s dlouhými vlákny. Orientace vláken může být nahodilá či uspořádaná. Krátká vlákna jsou mnohem menší ve srovnání s daným výrobkem, dlouhá vlákna jsou svou velikostí srovnatelná. [3]



Obr. č. 2.3: Dělení vláknové výztuže [1]

- částicové výztuže – využívají se zejména kvůli zvýšení tvrdosti, otěruvzdornosti a odolnosti při zvýšených teplotách. Mají větší modul pružnosti v tahu, tvarovou stálost při zvýšených teplotách a menší polymerační smrštění. Výhoda částicových kompozitů ve srovnání s vláknovými kompozity je ta, že většinou vlákna vyztužený materiál je vyroben v jednom kroku s konečným produktem a je složité oddělit od sebe užitečné vlastnosti materiálu od vlastnosti výrobku. Částicové výztuže jsou rozdílné v tom, že mají vlastnosti nezávislé na směru. [8, 9]



Obr. č. 2.4: Dělení částicové výztuže [1]

- kombinované výztuže – jsou tvořeny jak částicemi, tak vlákny

#### 2.1.2.2. Klasifikace kompozitů dle druhu matrice

- polymerní matrice
- skleněná matrice
- sklokeramická matrice
- keramická matrice
- uhlíková matrice [5]

#### 2.1.3. Textilní vlákna pro kompozity

Pro kompozity s textilní výztuží jsou využívána vlákna čedičová, skleněná, bórová, kovová, uhlíková, keramická, polymerní, proteinová a rostlinná. Tato vlákna mají specifické vlastnosti, mezi které patří vysoká tuhost, pevnost a teplotní stabilita. Tato vlákna bývají nejčastěji pojena polymerní maticí.

Textilní vlákna se používají do kompozitů pro zesílení, zvyšují zde tuhost a snižují tepelnou roztažnost a hmotnost výsledných výrobků. Textilní kompozity jsou zesíleny kontinuálními či krátkými vlákny. Vláknové kompozity obsahují vlákna o průměru 1 – 100  $\mu\text{m}$ . Někdy se používají vlákna o průměru nižším než 1  $\mu\text{m}$ , tyto kompozity se řadí mezi nanokompozity. [5, 9]



#### 2.1.4. Vlákenné produkty pro textilní výztuže

V závislosti na metodě výroby kompozitního materiálu mohou být vlákna zformována do různých polotovarů. Primárně se vlákna druzí do pramenů, které jsou výchozím bodem při následném zpracování v polotovary. [10]

- sekané prameny – lisovací a vstřikovací směsi
- mletá vlákna – křehká vlákna, např. skleněná
- rovingy – metoda stříkání, pultruze, navíjení
- prameny bez zákrutů
- příze
- pramencové tkaniny – tkaniny vyrobené z pramenů
- rovingové tkaniny – tkaniny vyrobené z rovingových pramenů, využití při laminování, pultruze, navíjení a při výrobě prepregů
- tkaniny z příze
- rohože – sekaná vlákna spojená polymerními lepidly
- prepregy – paralelně uspořádané rovingy, tkanina nebo rohož s polymerní maticí (reaktoplasty, termoplasty)

#### 2.1.5. Vlastnosti vláknových kompozitů

- Vysoká pevnost

Kompozity jsou používány k vytváření nosných konstrukcí, protože mají ve srovnání s konstrukční ocelí je jejich poměr pevnosti k měrné hmotnosti zhruba dvojnásobný. [7]

- Nízká hmotnost

Měrná hmotnost vláknových kompozitů je cca 1,5 krát nižší nežli měrná hmotnost hliníku a cca 4,5 krát menší než měrná hmotnost ocele. Tato vlastnost umožňuje snadnou manipulaci a není zapotřebí zvedací zařízení a také umožňuje sestavení dílčích částí konečné konstrukce mimo a poté je dopravit v celku. [7]

- Odolnost proti korozi

Kompozity jsou odolné proti atmosférické korozi, ale i proti korozi, která je způsobena chemikáliemi, vodou, bakteriemi, oleji atd. Z tohoto důvodu není zapotřebí jejich povrch opatřovat ochrannými povlaky či nátěry. [7]

- Tepelné a požární vlastnosti

Pokud kompozity patří mezi reaktoplasty, zvýšení teploty nezpůsobuje jejich tvárnost. Mezi významné vlastnosti pak patří nízká tepelná vodivost a rozměrová stálost.

Výsledné vlastnosti závisí na chemickém složení matrice a výztuže. [7]

- Elektrické vlastnosti – nevodivost, elektromagnetická transparentnost

Elektrická nevodivost se používá při výrobě elektrických izolátorů, plotů, zábradlí atd. Elektromagnetická transparentnost kompozitů se používá v blízkosti anténních systémů v podobě kompozitních profilů. [7]

- Snadné opracování

Kompozity je možné opracovávat (řezat, brousit, soustružit atd.) běžnými nástroji, které se používají na opracovávání kovů. [7]

#### **2.1.6. Použití kompozitů**

- Automobilový průmysl
- Letecký průmysl
- Stavebnictví
- Chemický průmysl
- Elektrotechnika

## 2.2. Čedič

Čedič neboli basalt je přírodní materiál pocházející z nejhojnější výlevné magmatické horniny. Tuto horninu lze nalézt ve většině zemí po celém světě, liší se chemickým složením v závislosti na umístění horniny. Čedič je tmavá hornina vyznačující se šedou až šedo-černou barvou. Charakteristickým znakem čediče je tvorba pětihranných až šestihranných pravidelných sloupců. [8]



Obr. č. 2.5: Detail čedičových sloupců

Čedičové horniny tají přibližně v rozmezí 1 500 – 1 700 °C. Pokud se čedič dostatečně rychle ochladí, vzniká amorfni sklovitá struktura. Krystalická struktura směsi minerálů vzniká při pomalém chladnutí. Čedičové horniny jsou vhodné pro výrobu vláken, pokud obsahují dva základní minerály. A to olivín ( $2(\text{MgFe}) \text{O SiO}_2$ ) a nefelin ( $\text{Na}_2\text{O Al}_2\text{O}_3 2\text{SiO}_2$ ). [9]

### 2.2.1. Složení čediče

Čedič se skládá z mnoha složek. Nejdůležitějšími chemickými složkami čediče jsou oxid křemičitý  $\text{SiO}_2$ , který je v čediči zastoupen nejvíce, dále oxid hlinitý  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , oxid vápenatý  $\text{CaO}$ , oxid hořečnatý  $\text{MgO}$ , oxid železnatý  $\text{FeO}$ , a oxid železitý  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . V tabulce č. 2.1. je vidět procentuální zastoupení jednotlivých složek v čediči.

Tab. č. 2.1: Složení čediče [8]

složka	obsah [%]	složka	obsah [%]	složka	obsah [%]
O	46.59	K	2.60	S	0.052
Si	27.72	Mg	2.09	Be	0.05
Al	8.72	Ti	0.63	Cl	0.048
Fe	5.01	P	0.13	Cr	0.037
Ca	3.63	H	0.13	C	0.032
Na	2.85	Mn	0.10	Ostatní	0.111

Podle obsahu oxidu křemičitého se čediče rozdělují do tří skupin, a to:

- bázické, neboli alkalické čediče (s obsahem  $\text{SiO}_2$  do 42 %),
- slabě kyselé čediče (s obsahem  $\text{SiO}_2$  v rozmezí od 43 – 46 %),
- kyselé čediče (s obsahem  $\text{SiO}_2$  nad 46 %). [9]

Základní hmota čediče je tvořena:

- olivín
- pyroxeny – augit, titanaugit,
- plagioklasy – labradorit, zborit,

Olivín je minerál s proměnlivým podílem železa a hořčíku. Tento podíl je závislý na podmínkách při vzniku čediče. Olivín tvoří asi 20 % hmotnosti.

Pyroxeny tvoří cca 50 % hmotnosti, jsou to metasilikáty, pro které je charakteristická téměř dokonalá štěpnost.

Plagioklasy patří mezi živce. Tvoří asi 30 % hmotnosti. [16]

### 2.2.2. Čedičová vlákna

Čedičová vlákna se řadí do skupiny horninových vláken. Výroba těchto vláken se více rozšířila teprve nedávno, jedná se o nový typ technického vlákna. Vlastnosti čedičových

vláken jsou velice podobné vlastnostem skleněných vláken typu S. Pro své vlastnosti jsou čedičová vlákna vhodná k výrobě produktů, na které jsou kladeny zvýšené užitné vlastnosti, tepelně – izolační vlastnosti, a také zvýšená chemická odolnost. Další výhodou je cena čedičových vláken, která je nižší než cena skleněných vláken. Povrch čedičových vláken je hladký a tyto vlákna mají kruhový průřez. [8, 13]

#### **2.2.2.1. Výroba čedičových vláken**

Technologie používaná na výrobu čedičových vláken je obdobná jako technologie na výrobu vláken skleněných. [15]

Základní požadavky na surovinu pro výrobu vláken:

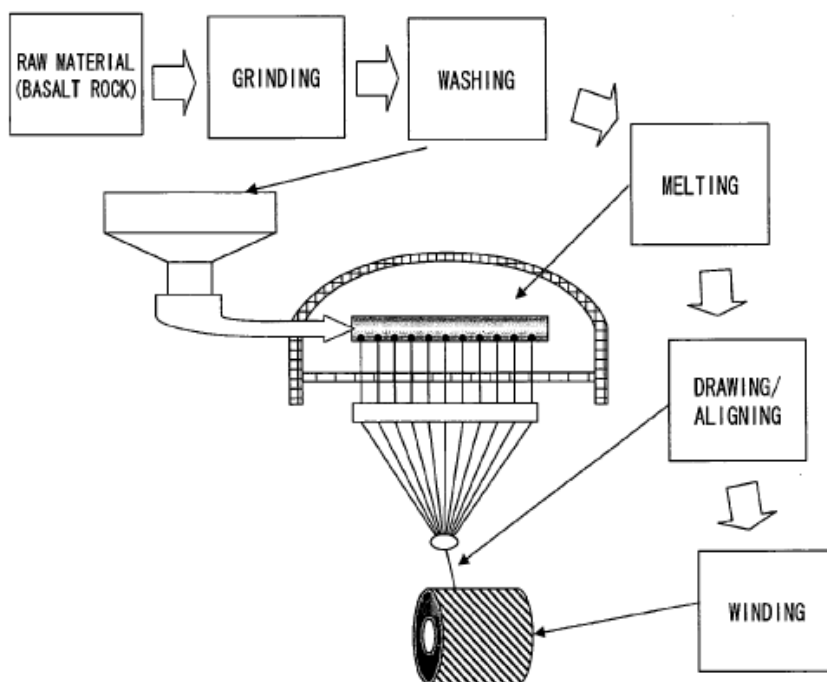
- Surovina musí být homogenní, stejnorodá. Čedič nesmí obsahovat tělesa jiného složení. Velmi škodlivé jsou také např. úlomky podložních hornin, jako jsou zrna křemene.
- Surovina nesmí být hrubozrnná. Všeobecně totiž platí, že se stoupající velikostí krystalů se prodlužuje doba tavení a také se zhoršuje homogenizace.
- Pro výrobu vláken by měl být používán čedič, který je neztvrdlý. Ztvrdnutím dochází k nežádoucím změnám v chemickém i nerostném složení.

Čedičová vlákna jsou vyráběna ve formě kontinuálních vláken nebo ve formě krátkých vláken. [15]

##### **2.2.2.1.1. Výroba kontinuálních čedičových vláken**

Při výrobě kontinuálních čedičových vláken je nutné zvolit teplotu, která se pohybuje cca od 1500 °C do 1700 °C. Čedič je roztaven na požadovanou teplotu a následně protlačována tryskami a dlužena cca při teplotě 1300 °C. Poté dochází k rychlému zchlazení.

Pro výrobu vláken nejsou vhodné všechny čedičové horniny. Jeho chemické složení musí být konstantní s obsahem SiO<sub>2</sub> cca 46 %. Důležitá je také schopnost tání bez pevných zbytků a tuhnutí bez výrazné krystalizace. [14]



Obr. č. 2.6: Schéma výroby kontinuálních čedičových vláken [17]

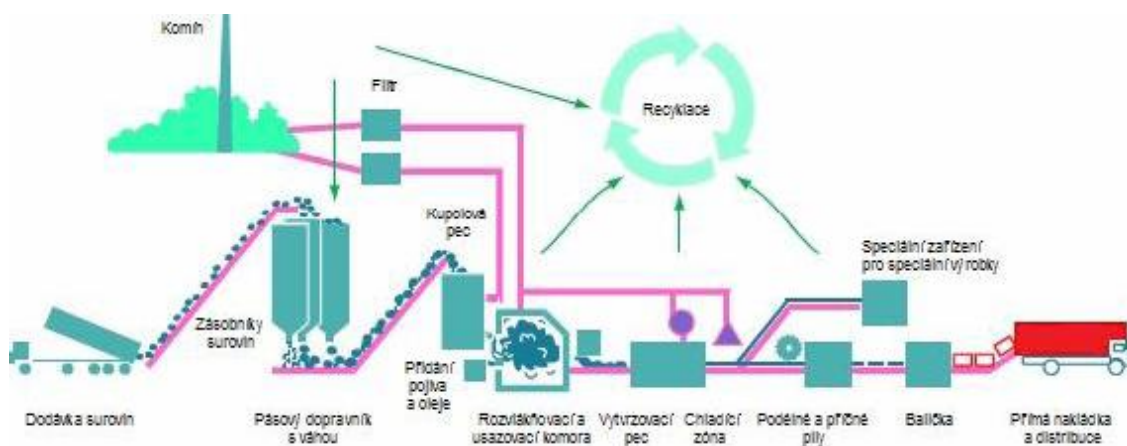
#### 2.2.2.1.2. Výroba krátkých čedičových vláken

Výroba krátkých čedičových vláken spočívá v roztavení čedičové horniny v tzv. kupolové peci při teplotách 1350 – 1450 °C. Tavenina vytékající na rotující válec se vlivem odstředivé síly změní v kapky. Tyto kapky se pomocí proudu ofukovacího vzduchu změní v jemné vlákno.

Kapky, které jsou chladnější nelze protáhnout a odletují ve formě drobných zrněk. Zrnka poté padají do spodní části rozvlákňovacího stroje, odkud jsou opět vráceny zpět do pece. Rozvlákněná hmota s malým počtem zrněk je unášena vzduchem do usazovací komory. V usazovací komoře jsou vlákna ještě zkrápěna vodním roztokem pojiva, vodooodpudivými přísadami, protiplísňovými a dalšími přísadami.

V usazovací komoře se smočená vlákna rovnoměrně usadí do vrstvy, která následně pokračuje do vytvrzovací komory. Tam se za pomoci pojiva a přísad působením tepla vytvrzuje. Ve vytvrzovací komoře dochází k odparu vody a polykondenzaci pojiva. Teplota v komoře je 180 – 220 °C. Z vytvrzovací pece vychází pás kamenné vlny přes přítlačné zařízení, které zajišťuje požadovanou objemovou hmotnost a tloušťku výrobku.

Pás kamenné vlny se pohybuje přes chladicí komoru až k diamantové pile. Tato pila má za úkol zformátovat výrobek ořezem na danou šířku. Ořezané okraje se recyklují, tím, že se vrací do tavicí pece. [18, 20]

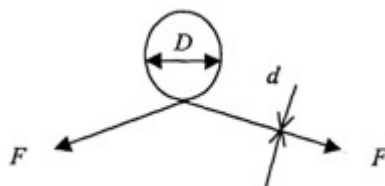


Obr. č. 2.7: Schéma výroby čedičovo – struskového vlákna [18]

#### 2.2.2.2. Vlastnosti čedičových vláken

Čedičová vlákna mají mnoho dobrých vlastností, díky kterým je možnost využít je v mnoha oborech. Tato vlákna mají vysokou pevnost, nízkou tažnost. Vlákna jsou nehořlavá, nenasákavá, mají nízkou tepelnou vodivost, vysoký elektrický odpor, dobrou tepelnou odolnost. Jednou z negativních vlastností těchto vláken je jejich křehkost. [13]

Křehkost čedičových vláken je spojena s pevností v tahu. Horninová vlákna jsou lámavá a křehká díky jejich nízké odolnosti v ohybu. Křehkost vlákna je dána vztahem  $R=D/d$ , kde  $D$  je průměr smyčky a  $d$  je průměr vlákna. [22]



Obr. č. 2.8: Schematické znázornění křehkosti vlákna [22]

Čedičová vlákna předčí svými fyzikálními, mechanickými a chemickými vlastnostmi vlákna skleněná, v tabulce 2.3 jsou uvedeny vlastnosti čedičových a skleněných vláken pro porovnání.

Tab. č. 2.2: Základní provedení čedičových vláken [13]

Sledované hodnoty	Hodnota	Jednotka
Průměr fibril	9 - 12	μm
Základní jemnost nitě	80, 160, ...2500, ...	tex
Průměrná pevnost	0,512	N/tex
Obsah lubrikace	1,0 – 1,5	%
Obsah spalitelných látek	0,69	%
Obsah vlhkosti	0,061	%
Počet zákrutů	0	1/m

Tab. č. 2.3: Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken [13]

Vlastnosti fyzikální	Jednotka	Čedič	Sklo
Hustota (při 20°C)	kg.m <sup>-3</sup>	2900	2600
Navlhavost	%	0,5	1,0
Modul pružnosti v tahu	MPa	100000	70000
Pevnost v tahu	MPa	1850 - 2150	1850 – 2150
Pevnost v tlaku	MPa	300	300
Vlastnosti chemické	Jednotka	Čedič	Sklo
Úbytek hmotnosti při 100 °C za 3 hod.			
v H <sub>2</sub> O	%	99,8	99,3
v 2N HCl	%	81,8	53,9
Vlastnosti tepelné	Jednotka	Čedič	Sklo
Pracovní teplota	°C	-200 až +800	-60 až +460
Měrná tepelná vodivost	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	0,027 až	0,029 až
Vlastnosti elektrické	Jednotka	Čedič	Sklo
Specifický odpor	Ω.m	10 <sup>12</sup>	10 <sup>11</sup>



### 2.2.2.3. Použití čedičových vláken

Dosud využívané materiály jako je sklo a azbest jsou v posledních letech nahrazovány čedičovými nekonečnými vlákny a čedičovými textiliemi z nich zhotovené. V průmyslovém odvětví jsou čedičová vlákna využívána stále častěji díky svým mechanickým, chemickým a tepelně-izolačním vlastnostem. Krátká čedičová vlákna se využívají zejména v podobě tepelněizolační desky pro izolaci šikmých a plochých střech, příček, stropů, stropních podhledů, provětrávaných a kontaktních fasád, sendvičového obvodového zdiva, podlah. Výrobky mohou sloužit také jako technické izolace pro tepelnou a zvukovou izolaci kotlů, pecí, rozvodů tepelných médií, vzduchotechnických zařízení, komínových těles, výfuků.

#### 2.2.2.3.1. Příklady uplatnění

- plná náhrada skleněných vláken při výrobě tkaniny v perlinkové vazbě pro stavebnictví (omítkové systémy, zalévací hmoty, ...)
- tepelně-izolační směsi ve stavebnictví pro žáruvzdorné stavební hmoty, plniva do tmelů apod.
- výztužné tkaniny v kompozitech a sekaná vlákna v plastických hmotách
- v různých technických výrobcích (rozbrušovací kotouče, lamináty, brzdové destičky, ...)
- izolace tepelné, zvukové a chemické (stavebnictví, letecký průmysl, elektrárny, automobily, ...)
- filtrování agresivních látek, tkaniny a ucpávkové šňůry v chemickém průmyslu (náhrada za azbestopryžové výrobky), horkovzdušná filtrace
- ochranné žáruvzdorné a kyselinovzdorné pracovní oděvy do provozů s velkou tepelnou zátěží a s agresivním chemickým prostředím (tkaniny s hliníkovou fólií v hutích, ocelárnách)
- pro hasiče a svářeče, v chemických provozech, galvanovnách, ...[13]

#### **2.2.2.4. Vliv čedičových vláken na zdraví**

Čedičový materiál je při běžném styku zdravotně nezávadný, je chemicky stálý a je určený pro technické použití. Z čedičového materiálu se samovolně neuvolňují žádné škodlivé látky. Čedičová vlákna nejsou fibrogenní ani karcinogenní.

Při práci s čedičovým materiálem je nutno dodržovat základní hygienické podmínky, může dojít k mechanickému podráždění pokožky, očí a horních cest dýchacích. Při dodržení podmínek je možno se těmito mechanickým účinkům vyhnout. Čedičová vlákna jsou ve formě nekonečných vláken, průměr těchto vláken je 9 - 13  $\mu\text{m}$ , tento průměr se dále neztenčuje ani při jejich zpracování a také se podélně neštěpí. [13]

#### **2.2.2.5. Ekologické přednosti čedičových vláken**

- plnohodnotná náhrada azbestových a skleněných vláken v různých průmyslových aplikacích
- menší zátěž pro životní prostředí při výrobě a likvidaci
- přírodní materiál zpracováváný bez dalších přísad
- energeticky méně náročná výroba než výroba skleněných vláken
- v přírodě bohatě se vyskytující nerost ve formě vhodné ke zvlákňování [13]

### 2.3. Metylsilikonový lak Lukosil M 130

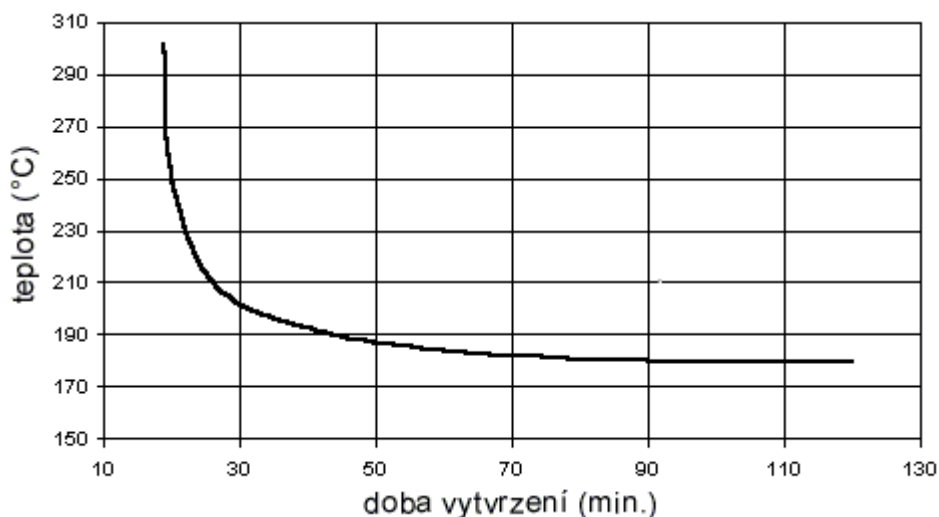
Pro výrobu vzorků byl použit Lukosil M 130, který patří mezi epoxidové pryskyřice. Lukosil M 130 představuje moderní typ silikonového laku zasychajícího při pokojové teplotě. Používá se ve formě roztoku silikonové pryskyřice v xylenovém rozpouštědle. Po nanesení a vytvrzení vykazuje řadu vynikajících vlastností, jako jsou:

- odolnost ve velkém rozsahu teplot
- hydrofobní vlastnosti
- separační vlastnosti filmů (plastické hmoty, potraviny)
- odolnost proti povětrnosti a UV záření
- možnost modifikace organických pryskyřic

Tab. č. 2.4: Základní parametry Lukosilu M 130 [21]

Vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Obsah netěkavých látek	%	50±2
Měrná hmotnost	kg.m <sup>-3</sup>	1000 - 1020
Viskozita	mPa.s/20°C	30 - 40
Konzistence	při 23°C	24 - 51
Číslo kyselosti	Mg KOH/g	0,02
Třída hořlavosti	-	2
Doba schnutí	hod	max 8
Tepelná odolnost	°C	max 230

Lukosil M 130 je při pokojové teploty nelepivý a pružný. Tepelným vytvrzením se dosáhne zvýšení jeho tvrdosti, mechanické a chemické odolnosti a stabilizuje se pro trvalé tepelné namáhání. Lukosil M 130 je možné vytvrdit zvýšením teploty bez použití katalyzátoru. Na grafu je znázorněna doba vytvrzení v závislosti na zvýšení teploty dle obr 4.1. [21]



Obr. č. 2.9: Graf závislosti doby vytvrzení na teplotě [21]

### 2.3.1. Použití Lukosilu M 130

- Elektrotechnika

Používá se jako pojivo elektroizolačních a tepelně odolných směsí a tmelů a při výrobě elektroizolačních desek. Používá se také jako ochranný nátěr desek tištěných spojů.

- Průmysl nátěrových hmot

Používá se jako pojivo pro výrobu tepelně odolných nátěrových hmot s použitím do 350°C. Lukosil zasychá v nátěrových hmotách při normální teplotě, což je výhodné u výrobků, které se vytvrzují při vlastním použití.

- Separční přípravek

Lukosil má výborné separační vlastnosti, a proto je možné ho použít jako mechanicky odolný separační nátěr forem pro odlévání a lisování pryskyřic, plastických hmot a kaučuků. Pro tyto účely je třeba nátěr tepelně vytvrdit. Není nutno používat katalyzátor. [21]

### 3. Experimentální část

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit kompozitní materiál s krátkovlákným čedičem.

Experimentální část je rozdělena do dvou částí. V první části je popsána výroba kompozitních materiálů. Druhá část se zabývá popisem zkoušek, které byly prováděny na vyrobených kompozitech. Dále je zde uveden přístroj, který byl použit pro testování kompozitů a popis zkoušky.

Na závěr jsou porovnány vlastnosti jednotlivých kompozitů v závislosti na tloušťce materiálu a jeho opětovném nasycení Lukosilem M 130 a vytvrzení v horkovzdušné peci.

#### 3.1. Výroba vzorků

Před samotnou výrobou bylo potřeba si připravit materiál a pomůcky. Poté bylo možné začít s výrobou vzorků, postup výroby je popsán v kapitole 3.1.2. Následně bylo zapotřebí připravit vzorky pro testování.

##### 3.1.1. Potřebný materiál a pomůcky

- čedičová vlákna
- Lukosil M 130



Obr. č. 3.1: Čedičová vlákna



Obr. č. 3.2: Lukosil M 130

- kovová deska s vyvrtanými dírami pro stahovací šrouby
- rám formy
- teflonový papír



Obr. č. 3.3: Kovová deska



Obr. č. 3.4: Rám formy

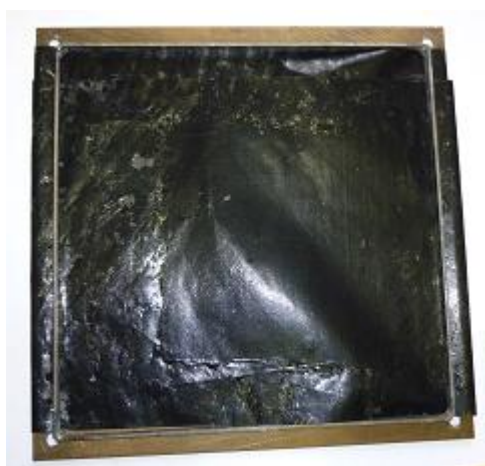
- sítko
- kádinka
- skleněná tyčinka
- horkovzdušná pec – HS 122 A



Obr. č. 3.5: Horkovzdušná pec – HS 122

### 3.1.2. Postup výroby kompozitních vzorků

Pro výrobu vzorků bylo zapotřebí připravit formu. Tuto formu tvořily dvě kovové desky o tloušťce 2,5 mm s vyvrtanými dírami pro šrouby, rám formy a teflonový papír. Rám formy byl vytvořen svařením čtyř kusů plechu o výšce 7,5 mm a rozměrech 200 x 200 mm. Na jednu plechovou desku byl položen teflonový papír, aby se kompozit nepřilepil ke kovové desce. Na vytvoření pevných okrajů formy bylo zapotřebí položit na desku s teflonovým papírem čtvercový rám.



Obr. č. 3.6: Forma na plechové desce s teflonovým papírem

Vzorky pro testování jsou tvořeny odpadem z čedičových vláken. Tento odpad byl získán od firmy Frýdlantské strojířny RASL. Nejprve bylo zapotřebí zbavit čedičová vlákna nečistot. Na pročištění bylo potřeba sítko, přes které byl materiál prosíván, aby z odpadu byly odstraněny nevláknenné zbytky čediče. Poté byl materiál vložen do kádinky, kde byl smíchán spolu s Lukosilem M 130 pomocí skleněné tyčinky. Vzniklá směs byla přechována do formy.



Obr. č. 3.7: Napěchovaná směs ve formě

Na napěchovanou směs ve formě byl položen teflonový papír a druhá kovová deska. Forma byla ve všech rozích zajištěna důkladným utažením čtyř šroubů. Důkladné utažení bylo potřeba z toho důvodu, aby forma byla zajištěna, co nejvíce napechována a vytlačil se přebytečný Lukosil M 130. Takto připravený vzorek byl položen na pečicí papír a vložen do horkovzdušné pece na 200 °C po dobu 6 hodin na vytvrzení.

Po vyndání vytvrzeného vzorku z pece bylo zapotřebí vzorek nechat vychladnout při pokojové teplotě. Po vychladnutí byly odstraněny stahovací šrouby a vzorek byl vyndán. Vzorek se musel vyříznout pomocí pilového listu, protože se připekkl ke čtvercové formě. Z tohoto vzorku byla získána kompaktní kompozitní deska.



### 3.1.3. Příprava kompozitních vzorků pro měření

Pro měření na dynamometru bylo potřeba připravit z desky vzorky o různých rozměrech, vzorky měly vždy přibližně stejnou délku a šířku 150 x 10 mm. Rozdílné rozměry měl vzorek v tloušťce, které byly stanoveny na 2,5; 5 a 7,5 mm.



Obr. č. 3.8: Vzorky pro měření 1x sycené

Vzorky z desky byly vyrobeny pomocí strojové pily. Následně byly vzorky ofrézovány na určitý rozměr. Materiál se řezal bez větších problémů. U frézování byly zapotřebí nastavit vyšší otáčky, aby se materiál nelepil na frézu.

### 3.1.4. Postup výroby vzorků z Lukosilu M 130

#### 3.1.4.1. Výroba vzorků pomocí kovové formy

Pro výrobu vzorků z Lukosilu M 130 byla potřeba kovová forma o rozměrech 150 x 150 mm, pečicí papír. Do připravené kovové formy byl vložen pečicí papír. Nakonec už zbývalo nalít Lukosil M 130 do formy s pečícím papírem.

Takto připravený vzorek byl vložen do horkovzdušné pece na 200 °C po dobu 6 hodin na vytvrzení.

Během pečení v horkovzdušné peci působením tepla se na vzorku tvořily vzduchové bubliny a Lukosil M 130 se vpil do pečicího papíru.



Obr. č. 3.9: Lukosil M 130 ve formě po vytvrzení v peci

Vzorek z Lukosilu M 130 nebylo možné použít pro zkoušení mechanických vlastností a porovnání s mechanickými vlastnostmi kompozitních vzorků.

#### 3.1.4.2. Výroba vzorků pomocí skleněných destiček

Pro výrobu těchto vzorků byly použity skleněné destičky. Skleněné destičky byly položeny na teflonový papír. Destičky byly poleženy přesně na předem zakreslené rozměry na pečícím papíru. Rozměry byly stejné jako u kompozitních vzorků a to 150 x 10 mm a rozdílné rozměry byly v tloušťce, rozměry byly 2,5; 5; 7,5 mm.

Následně byl vzorek vložen do horkovzdušné pece na 200 °C po dobu 6 hodin na vytvrzení. Vzorky v peci během vytvrzování vlivem probíhajících chemických reakcí "vybublaly" a následně došlo k úniku Lukosilu M 130 mimo formu, a proto nebylo možné vzorky z Lukosilu M 130 použít pro zkoušení mechanických vlastností a porovnání s mechanickými vlastnostmi kompozitních vzorků.

#### 3.1.4.3. Výroba vzorků pomocí formy z hliníkové folie

Při výrobě vzorků byla použita hliníková folie. Z této folie byla vytvořena forma o rozměrech 150 x 10 mm a rozdílné tloušťky, které byly 2,5; 5 a 7,5 mm. Do formy byl nalit Lukosil M 130.

Poté byl vzorek vložen do horkovzdušné pece na 200 °C po dobu 6 hodin na vytvrzení. Po vyjmutí z horkovzdušné pece se na vzorku vytvořily vzduchové bubliny.



Obr. č. 3.10: Detailní pohled na vzorek z Lukosilu M 130 v hliníkové folii po vytvrzení v peci

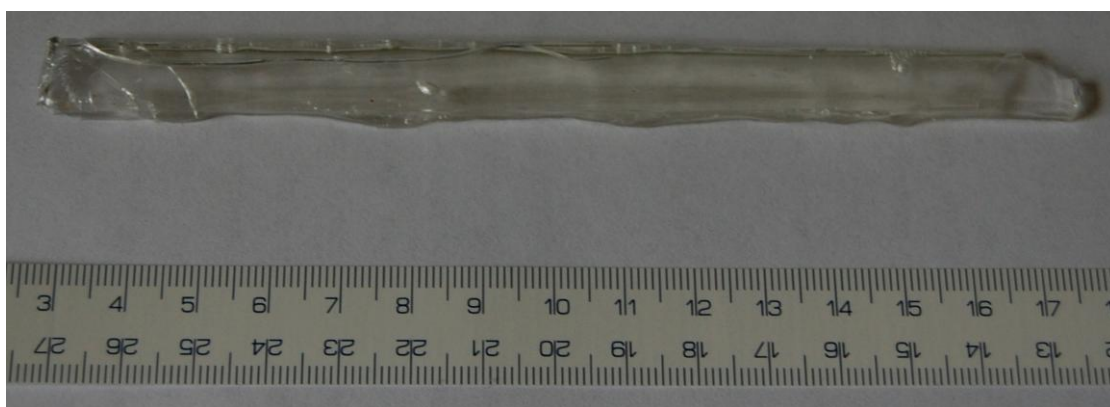


Obr. č. 3.11: Lukosil M 130 v hliníkové formě po vytvrzení v peci

Následně byla zvolena metodika postupného zvyšování teploty při vytvrzování až na konečných 200 °C s požadovanou dobou vytvrzení. Počáteční teplota byla 120 °C, následně byla zvýšena na 150 °C poté na 170° C.



Obr. č. 3.12: Vzorky z Lukosilu M 130 v hliníkové folii po vytvrzení v peci



Obr. č. 3.13: Vzorek z Lukosilu M 130 pro měření

## 3.2. Testování vzorků

### 3.2.1. Zkouška 3 – point bending pomocí dynamometru

Vlastnosti materiálů, které jsou v praxi namáhány na ohyb nebo se svou vlastní vahou dokážou prohnut, je zapotřebí znát ještě před jejich poslední aplikací v praxi. U těchto materiálů je vhodné využít při určení míry průhybu zkoušku tříbodovým ohybem. Tato zkouška dokáže do jisté míry stimulovat namáhání materiálu a tím určí, jestli je materiál vhodný pro konečnou aplikaci. Ohybová zkouška také pomáhá určit modul pružnosti  $E$  [MPa] u materiálů, u kterých nelze zjistit modul  $E$  z tahových či tlakových zkoušek s dostatečnou přesností.

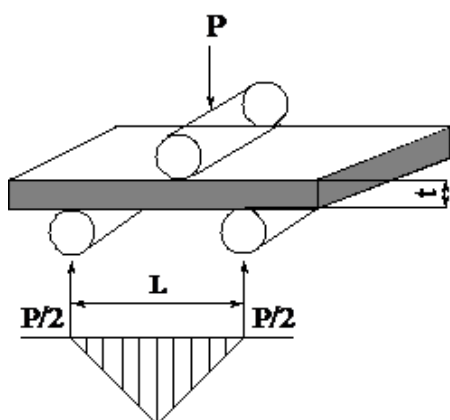
#### 3.2.1.1. Postup zkoušky

Zkouška 3 – point bending byla prováděna na přístroji TIRA TEST 2300 od firmy LABORTECH s typem čelistí odpovídajících zkoušce tříbodového ohybu. Přístroj je řízen počítačovým programem, který zároveň provádí výpočet základních statistických veličin.

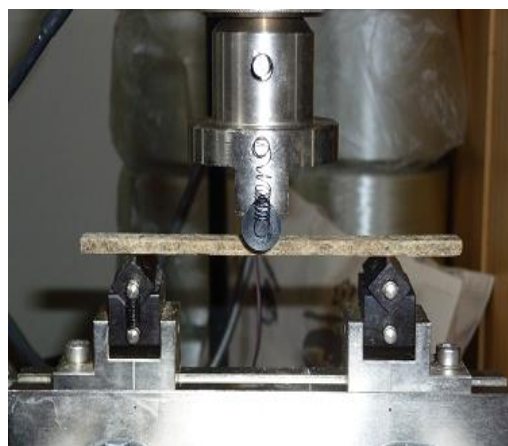


Obr. č. 3.14: TIRA TEST 2300 s čelistmi pro tříbodový ohyb

Při tříbodové zkoušce (obr. č. 3.15) je zkušební těleso podepřeno jako nosník dvěma podpěrami a konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se těleso nezlomí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. Po dosažení této hodnoty se horní čelist s trnem vždy vrátí do původní polohy.



Obr. č. 3.15: Schema tříbodového ohybu



Obr. č. 3.16: Tříbodový ohyb na dynamometru

Před zkouškou bylo nutné zadat do počítače tyto hodnoty:

- definice zkoušky – ohyb kompozitu
- výstupní hodnoty – modul pružnosti v ohybu  $E$  [N/mm<sup>2</sup>],
  - síla odpovídající posunu  $F_x$  [N],
  - maximální dosažená síla  $F_m$  [N],
  - napětí v ohybu  $\sigma_x$  [kPa]



- parametry zkoušeného vzorku – tloušťka  $h = 2,5 \text{ mm}$   
–  $5 \text{ mm}$   
–  $7,5 \text{ mm}$   
– šířka  $b = 10 \text{ mm}$   
– délka  $l = 150 \text{ mm}$
- rozpětí podpěr  $L = 100 \text{ mm}$
- rychlost posuvu –  $6 \text{ mm/min}$

Způsob přípravy zkušebních vzorků, jejich rozměry, rychlost zatěžování, rozměry podpěrných i zatěžovacích trnů a další náležitosti ohybových zkoušek jsou zakotveny pro daný typ materiálů v příslušných normách.

### Výpočty pro vyjádření výsledků

- Pevnost v ohybu - maximální napětí v ohybu, které zkušební těleso snese během zkoušky
- Napětí v ohybu - jmenovité napětí vnějšího povrchu zkušebního tělesa uprostřed rozpětí podpěr, počítá se dle vztahu

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (3.1)$$

kde  $F$  [N] je zatěžující síla,  $L$  [mm] je rozpětí podpěr,  $b$  [mm] šířka vzorku,  $h$  [mm] tloušťka vzorku

- Modul pružnosti v ohybu – vyjádřený v  $\text{N/mm}^2$  [Mpa], získáme z oblasti namáhání, v níž je lineární závislost průhybu na zatížení, přičemž záleží na geometrii vzorku

$$E = \frac{Fl^3}{4\chi hh^3} \quad (3.2)$$

kde  $X$  [mm] je průhyb,  $F$  [N] je zatěžující síla,  $l$  [mm] je délka vzorku,  $b$  [mm] je šířka vzorku,  $h$  [mm] tloušťka vzorku

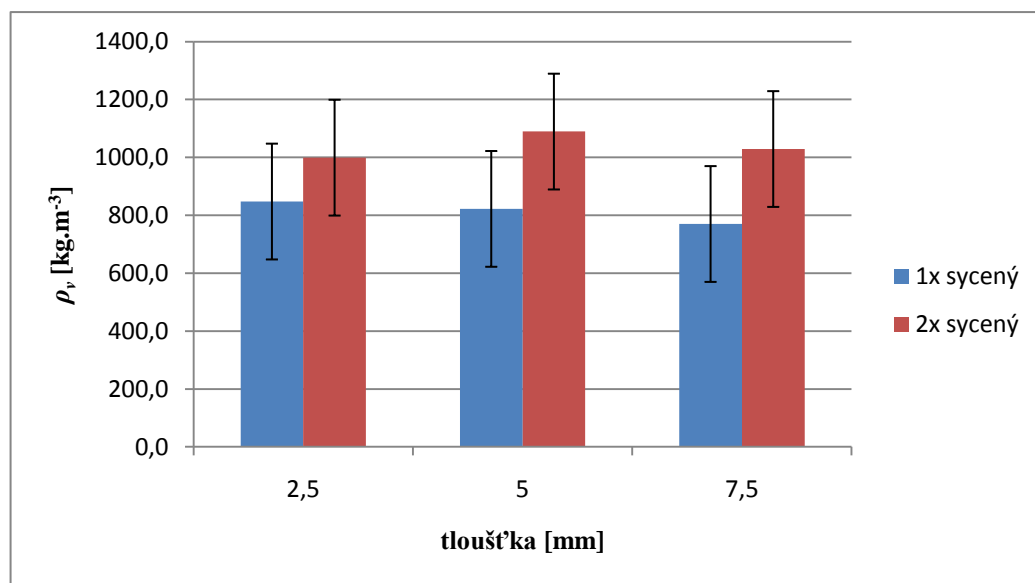
### 3.3. Diskuze výsledků

#### 3.3.1. Objemová měrná hmotnost kompozitních vzorků

Kompozitní vzorky o tloušťce 2,5; 5 a 7,5 mm byly měřeny 3x. Z těchto hodnot byly udělané průměrné hodnoty, z kterých byla vypočítána objemová měrná hmotnost.

Tab. č. 3.1: Průměrná objemová měrná hmotnost [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]

VZORKY		$m$ [g]	$l$ [mm]	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$\rho_v$ [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
2,5 mm	1x sycený	3,161	149,6	10,0	2,5	847,8
	2x sycený	4,622	149,8	10,5	2,9	999,4
5 mm	1x sycený	6,204	150,4	10,0	5,0	822,4
	2x sycený	8,766	149,6	10,3	5,2	1089,4
7,5 mm	1x sycený	8,602	151,3	10,0	7,4	770,2
	2x sycený	11,556	148,5	10,2	7,4	1029,2



Obr. č. 3.17: Graf objemové měrné hmotnosti

Jak je vidět z obrázku č. 3.17 hustota u opětovně nasycených vzorků vzrostla o 28 % oproti vzorkům, které byly nasyceny pouze jednou.



### 3.3.2. Zkouška kompozitních vzorků 3 - point bending na dynamometru

Zkouška třibodovým ohybem na dynamometru byla prováděna na přístroji TIRA test 2300. Tabulky jsou rozděleny podle tloušťky vzorku na 2,5; 5 a 7,5 mm. Jednotlivé tabulky jsou rozděleny na dvě části, na část 1x syceného vzorku a na druhou část, ve které jsou vzorky 2x sycené.

V tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty jednotlivých vzorků. Je zde uvedena síla  $F_m$  [N] a  $F_x$  [N], modul pružnosti  $E$  [N/mm<sup>2</sup>] a napětí v ohybu  $\sigma$  při  $F_m$  [MPa] a  $\sigma$  při  $F_x$  [MPa].

Tab. č. 3.2: Naměřené hodnoty 3 PB kompozitních vzorků o tloušťce 2,5 mm

VZORKY		$F_m$ [N]	$F_x$ [N]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ při $F_m$ [MPa]	$\sigma$ při $F_x$ [MPa]
2,5 mm	1x sycený	0,79	0,39	849,79	419,52	1,90	0,94
		0,79	0,39	849,79	419,52	1,90	0,94
		1,18	0,79	1269,31	849,79	2,83	1,90
	průměr	0,92	0,52	989,63	562,94	2,21	1,26
	2x sycený	5,43	5,12	3446,05	3249,31	13,03	12,29
		4,33	3,94	2747,96	2500,45	10,39	9,46
		3,54	3,15	2246,60	1999,09	8,50	7,56
	průměr	4,43	4,07	2813,53	2582,95	10,64	9,77

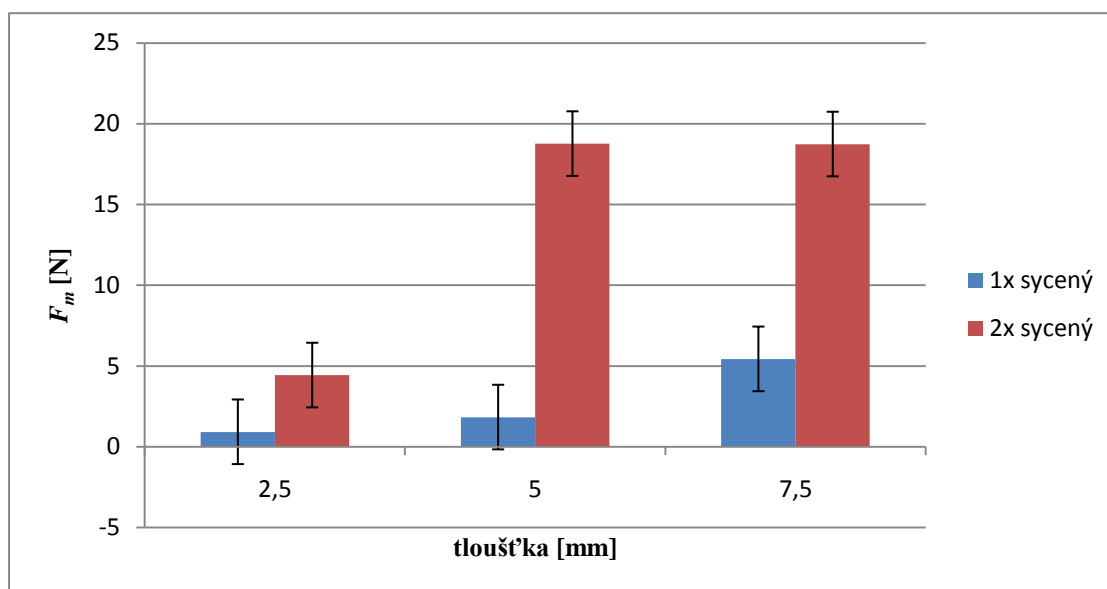
Tab. č. 3.3: Naměřené hodnoty 3 PB kompozitních vzorků o tloušťce 5 mm

VZORKY		$F_m$ [N]	$F_x$ [N]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ při $F_m$ [MPa]	$\sigma$ při $F_x$ [MPa]
5 mm	1x sycený	2,36	1,97	315,87	263,67	5,66	4,73
		1,57	0,79	210,13	105,74	3,77	1,90
		1,57	0,39	210,13	52,20	3,77	0,94
	průměr	1,83	1,05	245,38	140,54	4,40	2,52
	2x sycený	35,42	0	4096,91	0,00	85,01	0,00
		12,59	0,39	1456,24	45,11	30,22	0,94
		8,26	0	955,41	0,00	19,82	0,00
	průměr	18,76	0,13	2169,52	15,04	45,02	0,31

Tab. č. 3.4: Naměřené hodnoty 3 PB kompozitních vzorků o tloušťce 7,5 mm

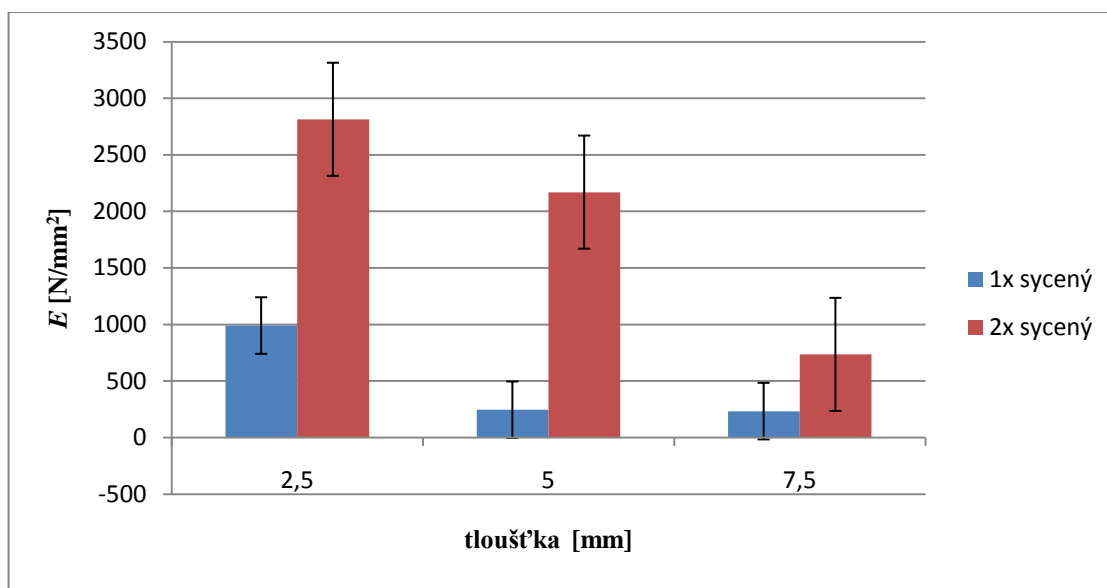
VZORKY		$F_m$ [N]	$F_x$ [N]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ při $F_m$ [MPa]	$\sigma$ při $F_x$ [MPa]
7,5 mm	1x sycený	1,97	0	84,53	0,00	4,73	0,00
		4,88	0	209,39	0,00	11,71	0,00
		9,45	1,57	405,47	67,36	22,68	3,77
	průměr	5,43	0,52	233,13	22,45	13,04	1,26
	2x sycený	18,5	3,15	725,42	123,52	44,40	7,56
		14,09	3,15	552,50	123,52	33,82	7,56
		23,61	0,39	925,80	15,29	56,66	0,94
	průměr	18,73	2,23	734,57	87,44	44,96	5,35

Na grafech č. 3.18 – 3.20 jsou znázorněny průměrné hodnoty z měření na přístroji TIRA test 2300. Hodnoty jsou rozděleny do dvou kategorií. Jedna kategorie představuje vzorky 1x sycené a druhá kategorie vzorky 2x sycené. Tyto dvě kategorie jsou pro názornost odděleny barevně, 1x sycené vzorky mají barvu modrou a vzorky 2x sycené mají barvu červenou.



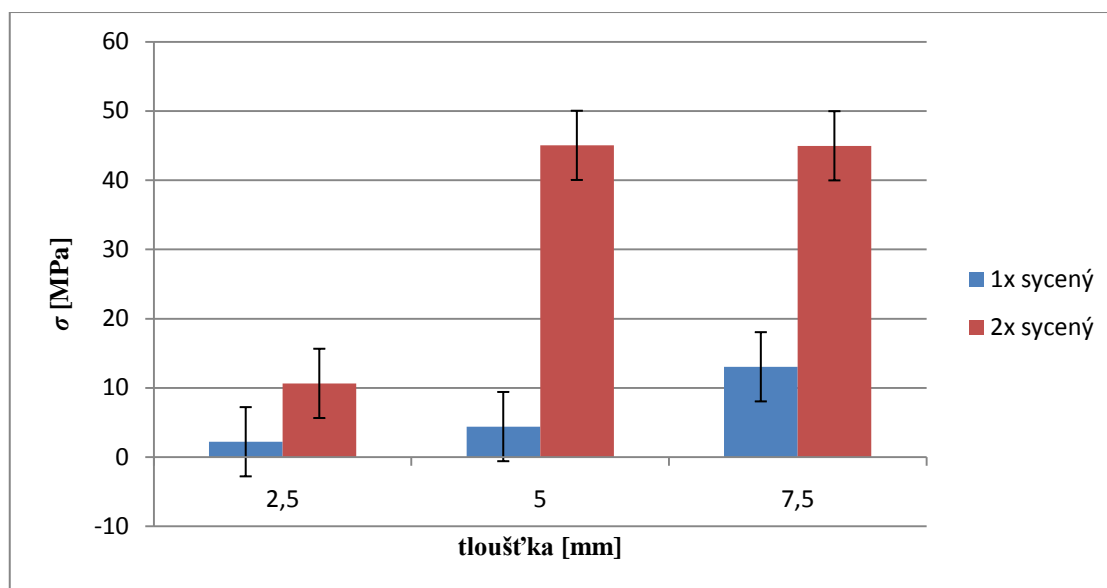
Obr. č. 3.18: Graf závislosti síly  $F_m$  [N] na tloušťce kompozitních vzorků

Na obr. č. 3.18 je zobrazen graf závislosti síly  $F_m$  [N] na tloušťce vzorků. Z grafu jsou patrné rozdíly mezi vzorky s jedním nasycením a vzorky s opětovným nasycením. Nárůst síly se projevil nejvíce u vzorků s tloušťkou 5 mm. U těchto vzorků s opětovným nasycením byl nárůst síly, která byla zapotřebí na deformaci vzorku, 9x větší oproti vzorku pouze jednou sycenému. U vzorků s tloušťkou 2,5 a 7,5 mm byl nárůst síly nižší oproti vzorku s tloušťkou 5 mm. U vzorků s tloušťkou 2,5 mm byl nárůst 4x vyšší a nejnižší nárůst byl u vzorků s tloušťkou 7,5 mm, nárůst byl pouze 2,5x vyšší.



Obr. č. 3.19: Graf závislosti modulu pružnosti  $E$  [N/mm<sup>2</sup>] na tloušťce kompozitních vzorků

Na obr. č. 3.19 je znázorněn graf závislosti modulu pružnosti  $E$  [N/mm<sup>2</sup>] na tloušťce vzorků. Z grafu je patrné, že nejvyšší modul pružnosti mají vzorky s opětovným nasycením a tloušťkou 2,5 mm a druhý nejvyšší modul pružnosti mají vzorky s opětovným nasycením a tloušťkou 5 mm. Nejvyšší nárůst modulu pružnosti je u vzorků s tloušťkou 5 mm, kde je nárůst 7,5x vyšší oproti vzorkům s jedním nasycením. U vzorků s tloušťkou 2,5 mm a opětovným nasycením je nárůst téměř 2x vyšší oproti vzorkům s jedním nasycením. Vzorek s tloušťkou 7,5 mm má nejnižší modul pružnosti jak u vzorků s jedním nasycením, tak i u vzorků s opětovným nasycením. U vzorků s tloušťkou 7,5 mm a opětovným nasycením je nárůst modulu pružnosti 2x vyšší oproti vzorkům s jedním nasycením.



Obr. č. 3.20: Graf závislosti napětí v ohybu  $\sigma$  [MPa] na tloušťce kompozitních vzorků

Na obr. č. 3.20 je zobrazen graf závislosti napětí v ohybu  $\sigma$  [MPa] na tloušťce vzorků. Z grafu jsou patrné rozdíly mezi vzorky s jedním nasycením a vzorky s opětovným nasycením. Nárůst síly se projevil nejvíce u vzorků s tloušťkou 5 mm. U těchto vzorků s opětovným nasycením byl nárůst 9x větší oproti vzorkům pouze jednou sycenému. U vzorků s tloušťkou 2,5 a 7,5 mm byl nárůst nižší oproti vzorku s tloušťkou 5 mm. U vzorků s tloušťkou 2,5 mm byl nárůst 4x vyšší a nejnižší nárůst byl u vzorků s tloušťkou 7,5 mm, nárůst byl jen 2,5x vyšší.

U vzorků s jedním nasycením mají hodnoty rostoucí charakter. U vzorků s opětovným nasycením mají hodnoty rostoucí charakter a následně se ustálily. Graf napětí v ohybu je totožný s grafem síly.

### 3.3.3. Průměrná objemová měrná hmotnost Lukosilu M 130

Vzorky z Lukosilu M 130 o tloušťce 1,5 a 4 mm byly měřeny 3x. Z těchto hodnot byly udělaný průměrné hodnoty, z kterých byla vypočítána objemová měrná hmotnost.

Tab. č. 3.5: Objemová měrná hmotnost [kg.m<sup>-3</sup>]

VZORKY	$m$ [g]	$l$ [mm]	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$\rho_v$ [kg.m <sup>-3</sup> ]
Lukosil M 130	1,3435	78,9	10,5	1,5	1081,1
	3,4571	79,1	10,1	4	1081,8

### 3.3.4. Zkouška vzorků z Lukosilu M 130 3 - point bending na dynamometru

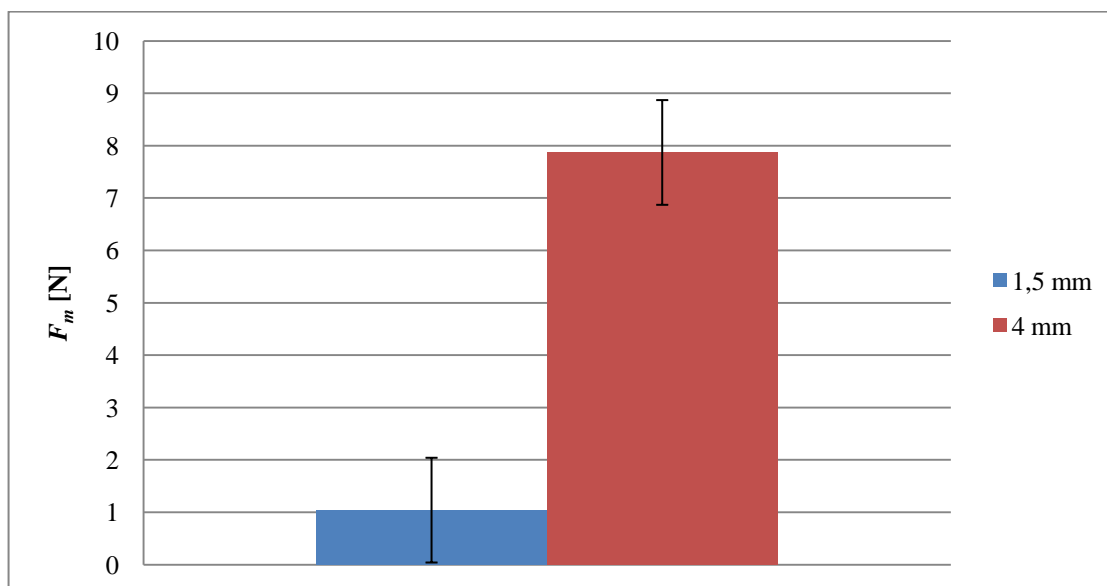
Zkouška tříbodovým ohybem na dynamometru byla prováděna na přístroji TIRA test 2300. Tabulka obsahuje naměřené hodnoty vzorků z Lukosilu M 130. Měření bylo prováděno na vzorku o tloušťce 1,5 a 4 mm.

V tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty jednotlivých vzorků. Je zde uvedena síla  $F_m$  [N] a  $F_x$  [N], modul pružnosti  $E$  [N/mm<sup>2</sup>] a napětí v ohybu  $\sigma$  při  $F_m$  [MPa] a  $\sigma$  při  $F_x$  [MPa].

Tab. č. 3.6: Naměřené hodnoty vzorků z Lukosilu M 130

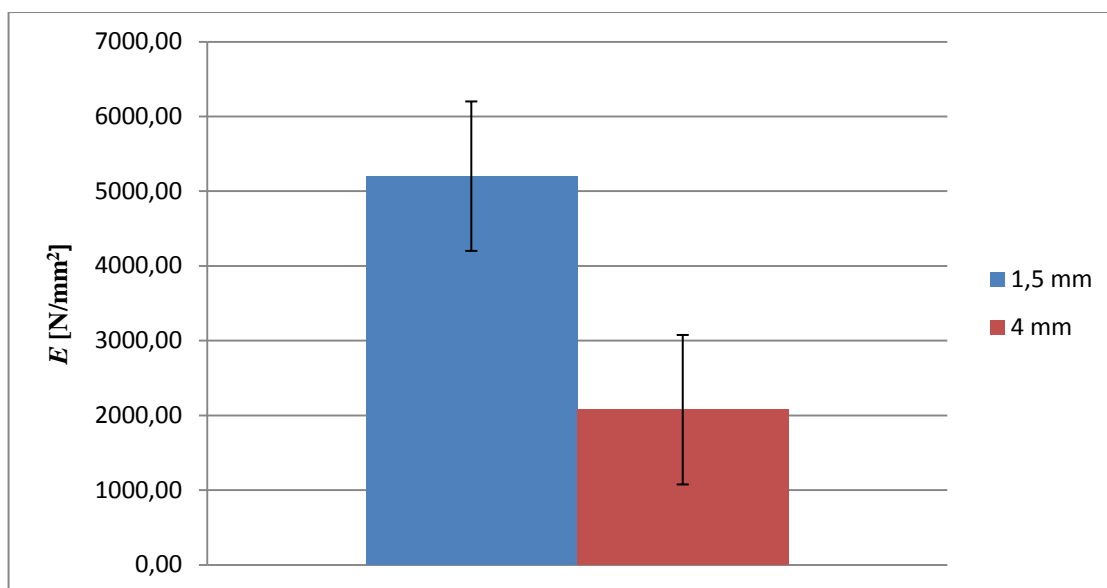
VZORKY	Tloušťka [mm]	$F_m$ [N]	$F_x$ [N]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ při $F_m$ [MPa]	$\sigma$ při $F_x$ [MPa]
Lukosil M 130	1,5	1,04	0,45	5200,00	2250,00	6,93	3,00
	4	7,87	0,31	2075,10	81,74	7,38	0,29

Na grafech č. 3.21 – 3.23 jsou znázorněny průměrné hodnoty ze tří měření na přístroji TIRA test 2300. Grafy jsou rozděleny do dvou kategorií. Jedna kategorie představuje vzorky s tloušťkou 1,5 mm a jsou označeny modrou barvou. Druhá kategorie představuje vzorky s tloušťkou 4 mm a je označena červenou barvou.



Obr. č. 3.21: Graf závislosti síly  $F_m$  [N] na tloušťce vzorků z Lukosilu M 130

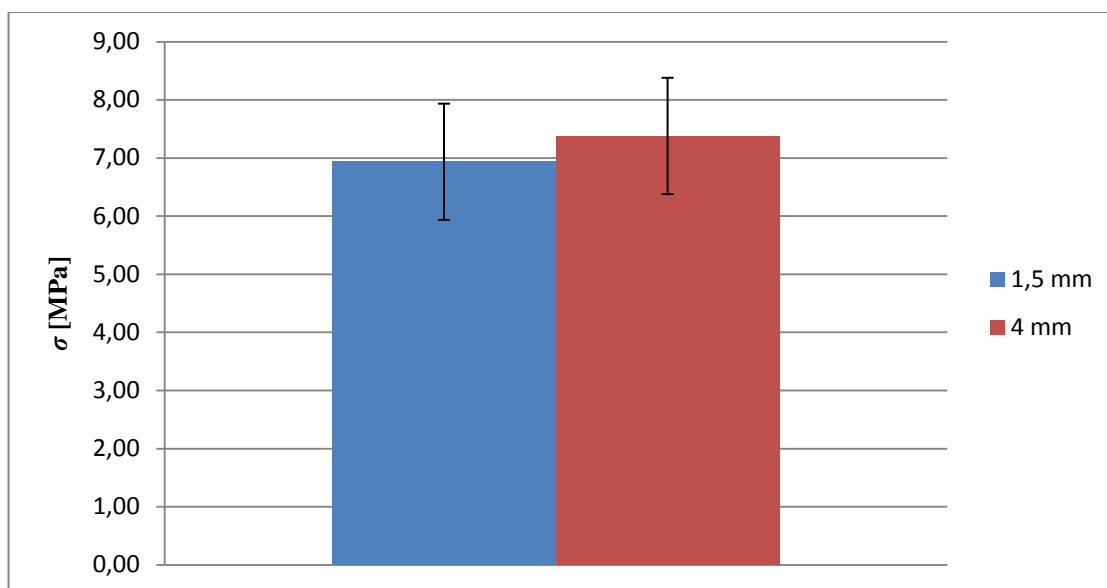
Na obr. č. 3.21 je zobrazen graf závislosti síly  $F_m$  [N] na tloušťce vzorků pouze z Lukosilu M 130. Z grafu jsou patrné rozdíly mezi vzorky s tloušťkou 1,5 a 4 mm. Nárůst síly u vzorku s tloušťkou 4 mm je 6,5 x vyšší oproti vzorku s tloušťkou 1,5 mm



Obr. č. 3.22: Graf závislosti modulu pružnosti  $E$  [N/mm<sup>2</sup>] na tloušťce vzorků z Lukosilu M 130

Na obr. č. 3.22 je znázorněn graf závislosti modulu pružnosti  $E$  [N/mm<sup>2</sup>] na tloušťce vzorků pouze z Lukosilu M 130. Z grafu je patrné, že vyšší modul pružnosti má vzorek s tloušťkou 1,5 mm. Modul pružnosti u vzorků s tloušťkou 1,5 mm je 1,5 x vyšší oproti vzorku s tloušťkou 4 mm.



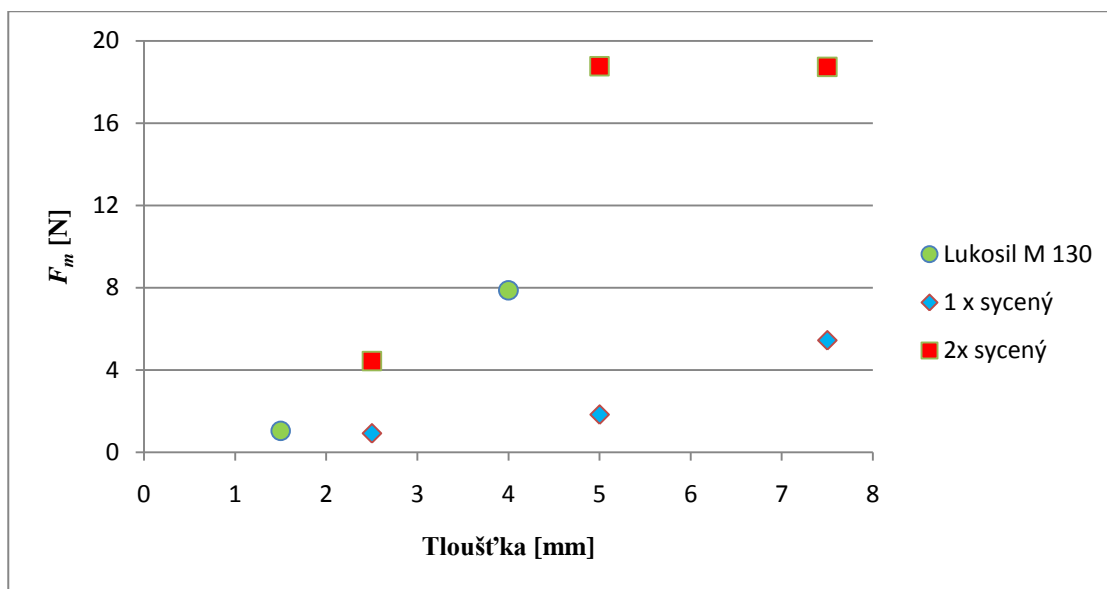


Obr. č. 3.23: Graf závislosti napětí v ohybu  $\sigma$  [MPa] na tloušťce vzorků z Lukosilu M 130

Na obr. č. 3.23 je zobrazen graf závislosti napětí v ohybu  $\sigma$  [MPa] na tloušťce vzorků pouze z Lukosilu M 130. Z grafu je patrné, že rozdíly mezi vzorky s tloušťkou 1,5 a 4 mm nejsou velké. Vzorky s tloušťkou 4 mm dosahuje vyšší napětí v ohybu než vzorky s tloušťkou 1,5 mm. Nárůst modulu pružnosti u vzorků s tloušťkou 4 mm je pouze 0,06 x vyšší oproti vzorkům s tloušťkou 1,5 mm.

### 3.3.5. Porovnání vlastností kompozitních vzorků se vzorky z Lukosilu M 130

Obrázky č. 3.24 – 3.26 znázorňují grafy porovnání vlastností kompozitních vzorků jak 1x sycených tak 2x sycených a vzorků z Lukosilu M 130. Je porovnávána maximální síla  $F_m$  [N], modul pružnosti  $E$  [N/mm<sup>2</sup>] a napětí v ohybu  $\sigma$  [MPa].

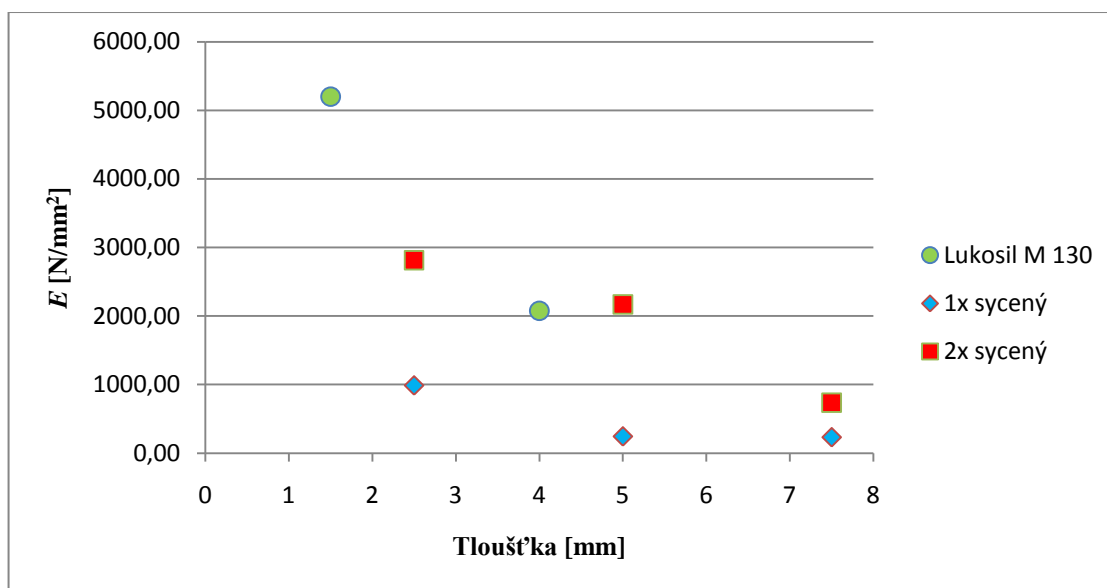


Obr. č. 3.24: Graf porovnání síly  $F_m$  [N] u kompozitů a vzorků z pouze z Lukosilu M 130 v závislosti na tloušťce vzorku

Na obr. č. 3.24 je znázorněn graf porovnání síly  $F_m$  [N] u kompozitů a vzorků pouze z Lukosilu M 130 v závislosti na tloušťce vzorku. Na grafu je vidět, že kompozitní vzorky 2x sycené dosahují vyšších hodnot než vzorky pouze z Lukosilu M 130. Vzorky 1x sycené dosahují nižší hodnoty oproti vzorkům pouze z Lukosilu M 130.

U kompozitních vzorků 2x sycených s tloušťkou 5 mm, které se dají porovnávat se vzorky pouze z Lukosilu M 130 s tloušťkou 4 mm, je nárůst 1,3 x vyšší oproti vzorkům z pouze z Lukosilu M130.

Naměřené hodnoty závisí na koncentraci Lukosilu M 130 v kompozitu, ale také na vnitřní struktuře kompozitu. Kompozit má izotropní uspořádání ve struktuře, určitá koncentrace vláken začíná zlepšovat mechanické vlastnosti Lukosilu M 130.

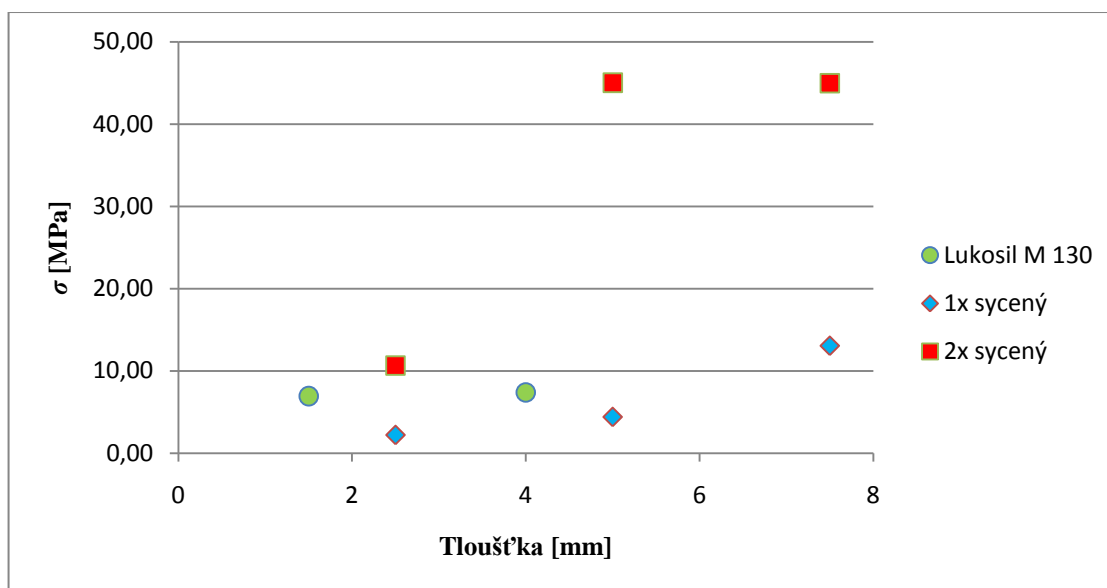


Obr. č. 3.25: Graf porovnání modulu pružnosti  $E$  [N/mm<sup>2</sup>] u kompozitů a vzorků pouze z Lukosilu M 130 v závislosti na tloušťce vzorku

Na obr. č. 3.25 je znázorněn graf porovnání modulu pružnosti  $E$  [N/mm<sup>2</sup>] u kompozitů a vzorků z Lukosilu M 130 v závislosti na tloušťce vzorku. Na grafu je patrné, že vzorky z Lukosilu M 130 s tloušťkou 1,5 mm dosahují nejvyšších hodnot modulu pružnosti  $E$  [N/mm<sup>2</sup>].

Potvrzuje to, že čím má vzorek menší tloušťku, tím je pružnější.

Kompozitní vzorky 2x sycené s tloušťkou 5 mm a vzorky z Lukosilu M 130 dosahují téměř stejných hodnot modulu pružnosti  $E$  [N/mm<sup>2</sup>].

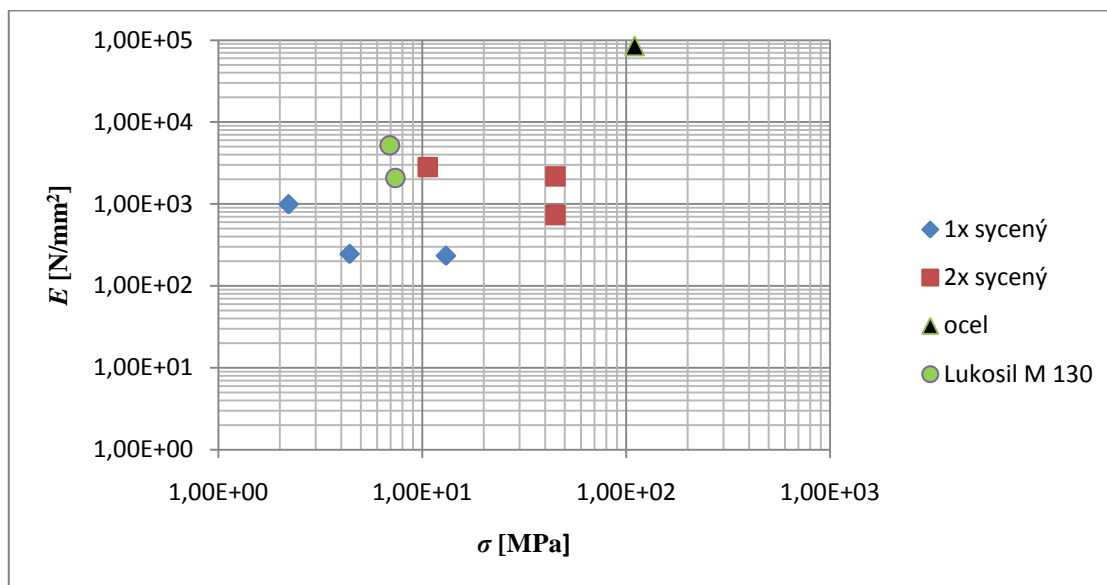


Obr. č. 3.26: Graf porovnání napětí v ohybu  $\sigma$  [MPa] u kompozitů a vzorků pouze z Lukosilu M 130 v závislosti na tloušťce vzorku

Na obr. č. 3.26 je znázorněn graf porovnání napětí v ohybu  $\sigma$  [MPa] u kompozitů a vzorků z Lukosilu M 130 v závislosti na tloušťce vzorku. Na grafu je vidět, že kompozitní vzorky 2x sycené dosahují 5 x vyšších hodnot než vzorky z Lukosilu M 130. Vzorky 1x sycené dosahují podobných hodnoty oproti vzorkům z Lukosilu M 130.

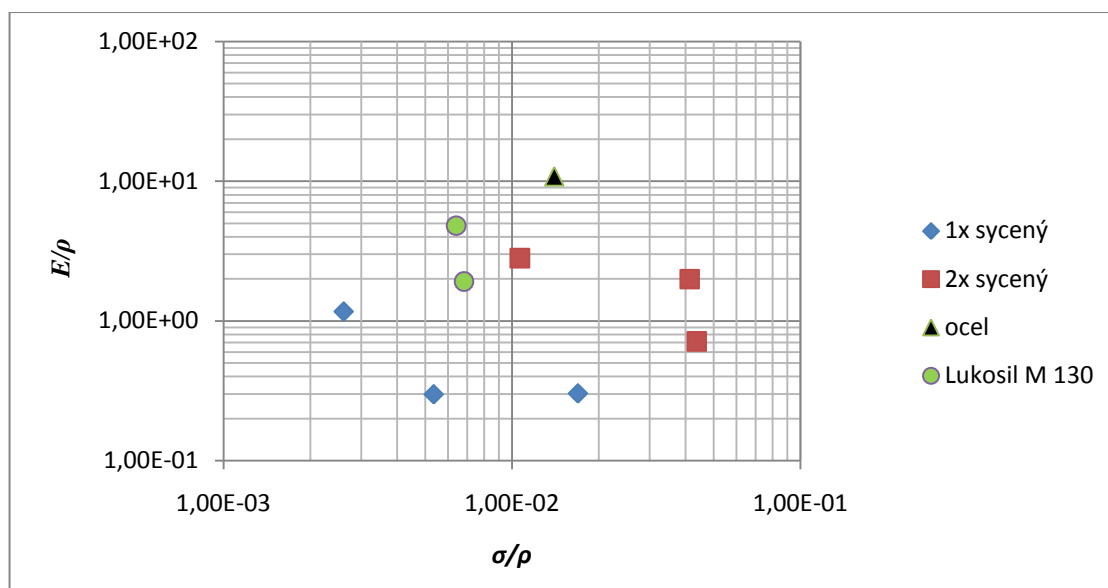
### 3.3.6. Porovnání mechanických vlastností kompozitů a Lukosilu M 130 s vlastnostmi oceli 11 343

Pro efektivnější porovnání mechanických charakteristik vyrobených kompozitů a vzorků pouze z Lukosilu M 130 byly zjištěné hodnoty dány do závislosti dle Michaela F. Ashby [24] a porovnány s vlastnostmi oceli 11 343 pro možné využití v praxi.



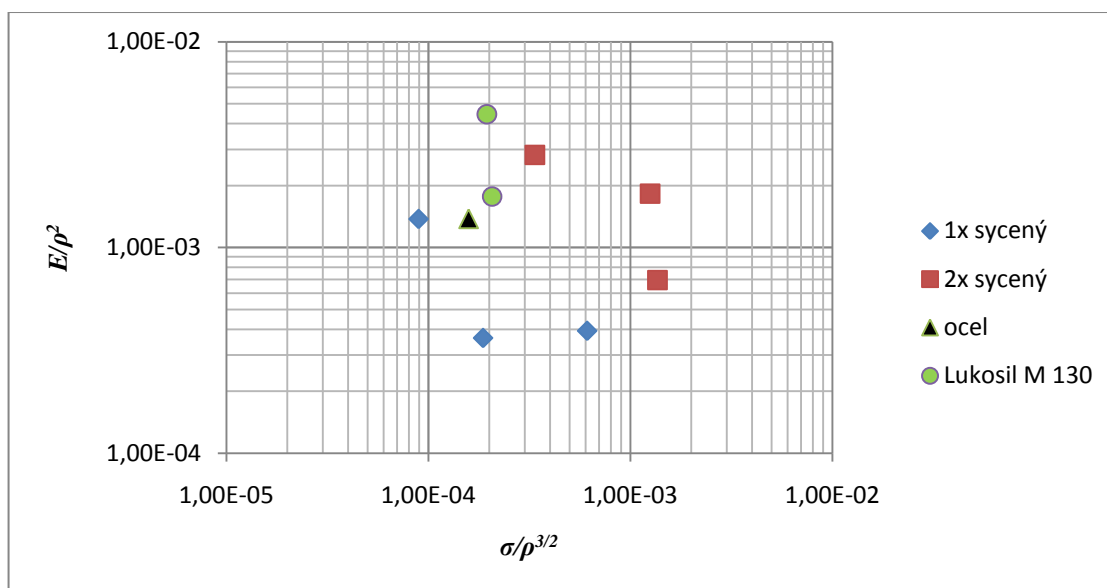
Obr. č. 3.27: Graf závislosti modulu pružnosti  $E$  [N/mm²] na napětí v ohybu  $\sigma$  [Mpa]

Na obr. č. 3.27 je znázorněn graf závislosti napětí v ohybu  $\sigma$  [Mpa] na modulu pružnosti  $E$  [N/mm²]. Při porovnávání kompozitních materiálů a Lukosilu M 130 s ocelí 11 343 jsou vzorky 1x sycené vzdálené charakteristikám oceli. Vzorky 2x sycené a vzorky pouze z Lukosilu M 130 dosahují lepších vlastností a blíží se charakteristikám oceli 11 343 oproti vzorkům 1x syceným.



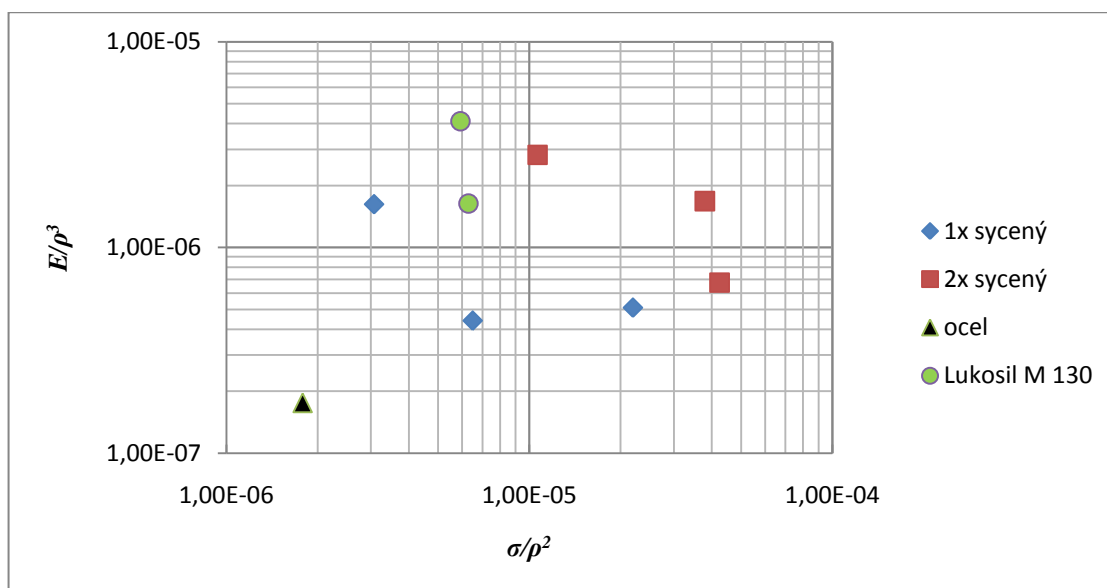
Obr. č. 3.28: Graf závěsu (tažného členu)

Na obr. č. 3.28 je zobrazen závěs neboli tažný člen. V porovnání charakteristik pro použití tažného členu neboli závěsu jsou rozdíly mezi kompozitními materiály a Lukosilem M 130 s ocelí 11 343 menší oproti předchozímu grafu. Kompozitní vzorky 2x sycené a vzorky z Lukosilu M 130 se přibližují více k mechanickým vlastnostem oceli 11 343 oproti 1x syceným.



Obr. č. 3.29: Graf nosníku nebo torzního členu

Na obr. č. 3.29 je znázorněn graf nosníku nebo torzního členu. Při porovnání mechanických vlastností mezi kompozitními materiály a Lukosilem M 130 s ocelí 11 343 se dostávají kompozitní materiály a Lukosil M 130 na úroveň vlastností oceli 11 343. Kompozitní vzorky 2x sycené a vzorky z Lukosil M 130 se dostávají nad úroveň vlastností oceli 11 343 a tím vykazují lepší vlastnosti než ocel 11 343. Kompozitní vzorky 1x sycené jsou na úrovni vlastností oceli 11 343.



Obr. č. 3.30: Deska namáhaná na ohyb

Na obr. 3.30 je znázorněn graf desky namáhané na ohyb. Při porovnání mechanických vlastností oceli 11 343 s kompozitními materiály a Lukosilem M 130 se výrazně lepší jeví kompozitní materiály a Lukosil M 130. Kompozitní vzorky 2x sycené a vzorky z Lukosilu M 130 předčily vlastnosti oceli 11 343 a mají mnohonásobně vyšší hodnoty. Kompozitní vzorky 1x sycené jsou na úrovni vlastností oceli 11 343. Pro praktické použití se jeví jako nejlepší kompozitní vzorky 2x sycené a vzorky z Lukosilu M 130.

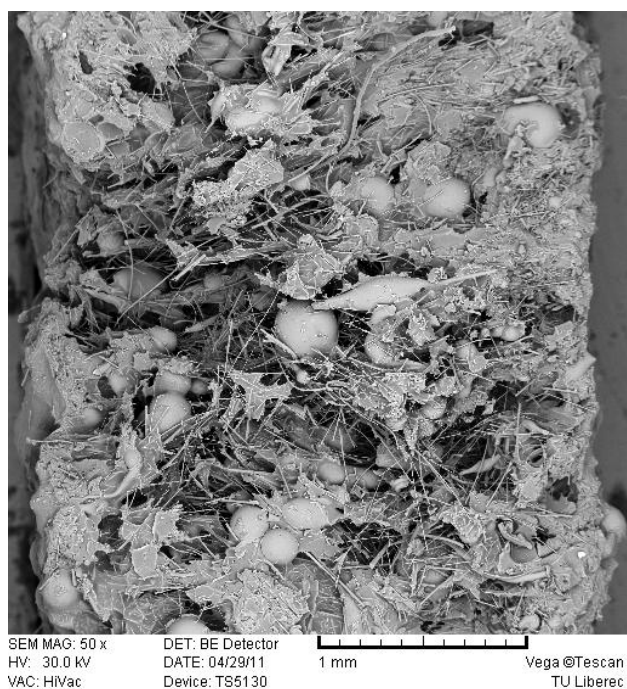


### 3.4. Detailní pohled na lom vzorků

#### 3.4.1. Kompozitní vzorky



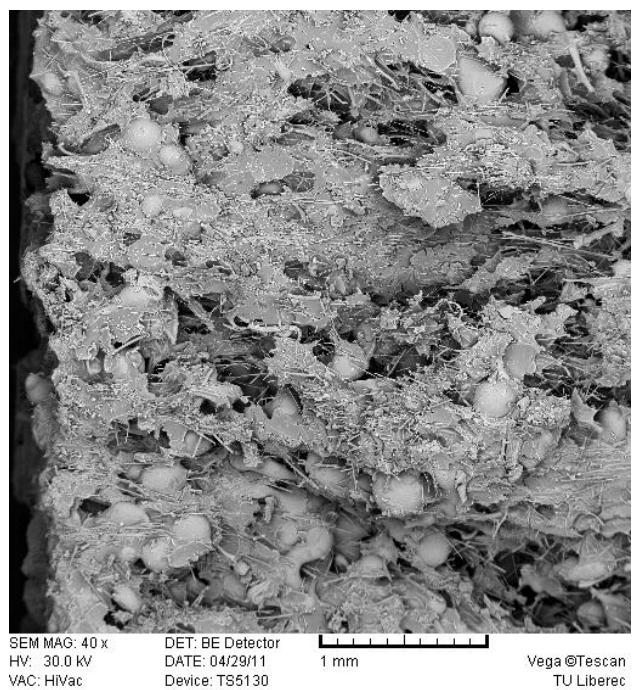
Obr. č. 3.31: Detailní pohled na lom vzorku s tloušťkou 2,5 mm 1x sycený



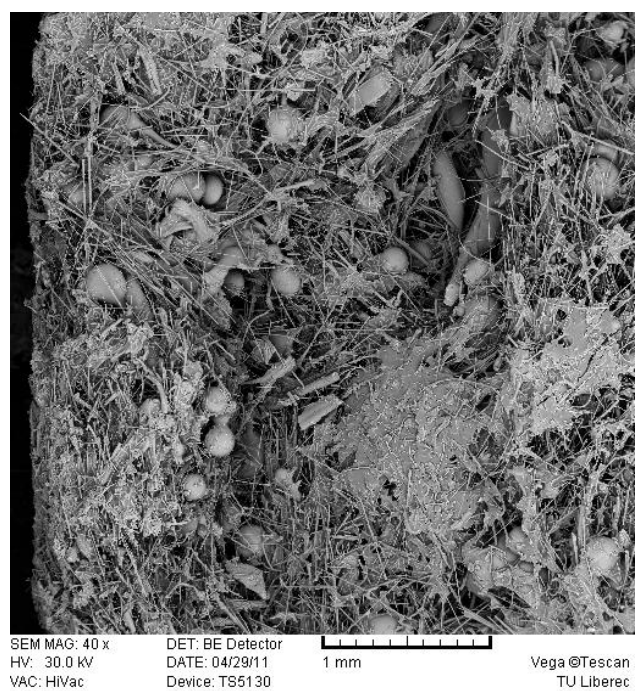
Obr. č. 3.32: Detailní pohled na lom vzorku s tloušťkou 2,5 mm 2x sycený



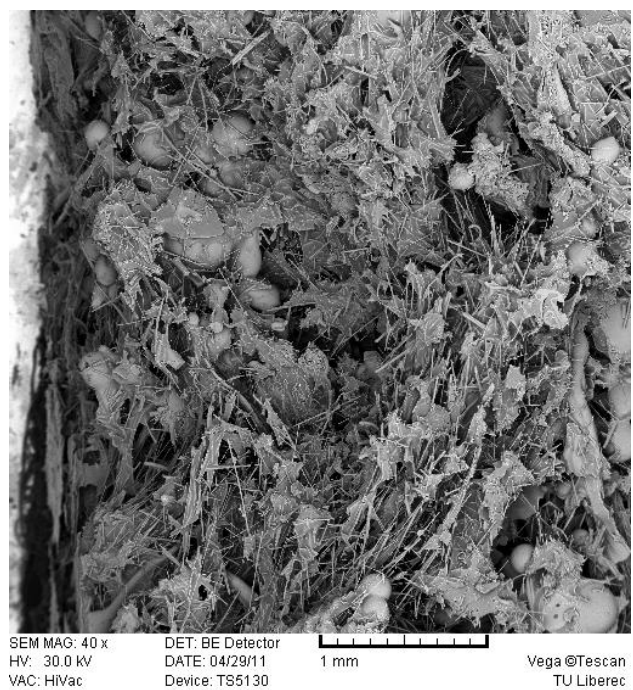
Obr. č. 3.33: Detailní pohled na lom vzorku s tloušťkou 5 mm 1x sycený



Obr. č. 3.34: Detailní pohled na lom vzorku s tloušťkou 5 mm 2x sycený

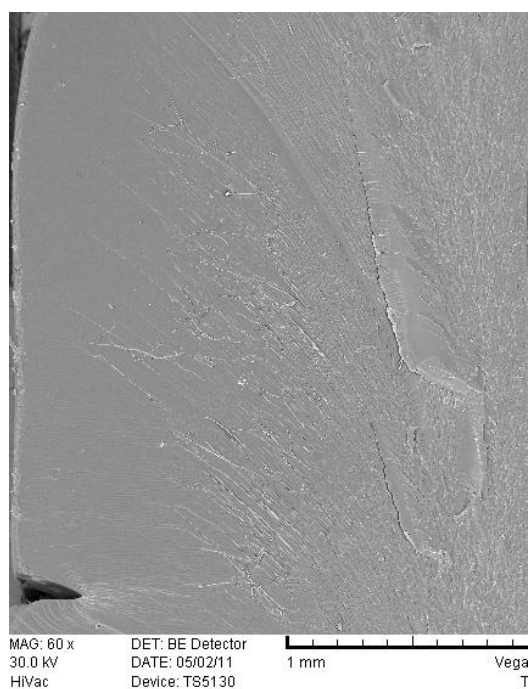


Obr. č. 3.35: Detailní pohled na lom vzorku s tloušťkou 7,5 mm 1x sycený

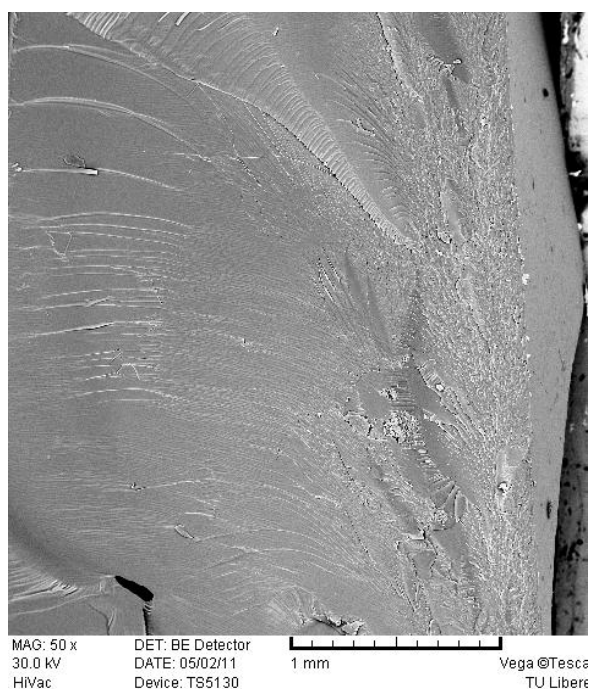


Obr. č. 3.36: Detailní pohled na lom vzorku s tloušťkou 7,5 mm 2x sycený

### 3.4.2. Vzorky z Lukosilu M 130



Obr. č. 3.37: Detailní pohled na lom vzorku z Lukosilu M 130



Obr. č. 3.38: Detailní pohled na lom vzorku z Lukosilu M 130

Obrázky č. 3.31 – 3.38 byly pořízeny na rastrovacím elektronovém mikroskopu. Tento mikroskop je umístěn v laboratoři KTM. Na obrázcích jsou vidět detailní lomy kompozitních vzorků a vzorků z Lukosilu M 130. U kompozitních vzorků je vidět nasycení Lukosilem M 130 a opětovné nasycení. Nasycení je vidět u všech vzorků ve všech tloušťkách.

#### 4. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vyrobit kompozitní materiály s krátkovlákným čedičem a matricí z Lukosilu M 130 a také vzorky pouze z Lukosilu M 130 pro porovnání změny vlastností. Následně otestovat jejich mechanické vlastnosti. Výroba kompozitních vzorků nebyla náročná, stačilo pročistit získaný materiál a smíchat ho s Lukosilem M 130. Pro další srovnání vlastností byly vytvořeny nové kompozitní vzorky různých rozměrů a to 2,5; 5 a 7,5 mm s opětovným nasycením a následným vytvrzením v peci. U vzorků pouze z Lukosilu M 130 se vyskytly problémy s výrobou, která vyžadovala spoustu času a úsilí. Pro výrobu vzorků pouze z Lukosilu M 130 bylo zapotřebí měnit způsob výroby a nalézt vhodný způsob výroby vzorků pro testování. Z prvních dvou způsobů nebylo možné využít vzorky pro testování. Třetí možnost výroby pomocí hliníkové folie přinesla úspěch.

Pro testování byla zvolena zkouška 3 – point bending test na dynamometru. Výsledkem testu byly parametry: síla  $F_m$  [N], modul pružnosti  $E$  [N/mm<sup>2</sup>] a napětí v ohybu  $\sigma$  [MPa]. Při zkoušení mechanických vlastností byly zkoušeny nejprve vzorky s jedním nasycením, poté s opětovným nasycením a na závěr vzorky pouze z Lukosilu M 130. Při porovnání naměřených výsledků mezi testovanými vzorky bylo zjištěno, že opětovné nasycení má významný vliv na výsledné vlastnosti kompozitních materiálů. Z naměřených hodnot u vzorků s jedním nasycením a vzorků pouze z Lukosilu M 130 byly zjištěny podobné hodnoty. U vzorků s opětovným nasycením je potvrzen synergický efekt, neboť byly naměřeny hodnoty, které mnohonásobně převyšovaly hodnoty naměřené na vzorcích s jedním nasycením a na vzorcích pouze z Lukosilu M 130. Nejvyšší vliv opětovného nasycení se projevil u vzorku s tloušťkou 5 mm.

Naměřené hodnoty závisí na koncentraci Lukosilu M 130 v kompozitu, ale také na vnitřní struktuře kompozitu. Kompozit má izotropní uspořádání ve struktuře, určitá koncentrace vláken začíná zlepšovat mechanické vlastnosti Lukosilu M 130.

Pro skutečné porovnání naměřených hodnot nově vzniklého materiálu, který tvoří krátkovlákným čedičový odpad a Lukosil M 130, s běžně užívaným v praxi jako je ocel 11 343 byly zjištěny srovnatelné hodnoty. Srovnatelné hodnoty s ocelí má vzorek o tloušťce 5 mm 2x sycený. Při 8 x nižší objemové měrné hmotnosti má kompozitní vzorek srovnatelné a mnohdy i lepší vlastnosti než ocel. V některých oblastech průmyslu by se ocel mohla nahradit těmito kompozitními materiály např. při tvorbě

konstrukcí nebo jako výztuhy ve stavebnictví. Další využití tohoto kompozitního materiálů se nabízí v oblasti izolačních materiálů.

Práce navazuje na bakalářskou práci J. Möbiuse, která se zabývala dynamicko – mechanickými vlastnostmi stejných kompozitů. Práci bylo zapotřebí doplnit o statické mechanické vlastnosti kompozitních materiálů a vlastnosti Lukosilu M 130, což bylo cílem této bakalářské práce. Dále by bylo zapotřebí zdokonalit výrobu vzorků pouze z Lukosilu M 130. Pro další experiment doporučuji více se soustředit na poměr čedič / Lukosil M 130 / vzduch a nalézt správný poměr nebo nahradit Lukosil M 130, který je v kompozitu použit jako matrice, jiným druhem matrice.

## 5. Doporučená literatura

- [1] Laš, V.: Mechanika kompozitních materiálů. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273 – X.
- [2] Delta.fme.vutbr [online]. 2009 [cit. 8.2.2011]. Kompozity. Dostupné na internetu: <<http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf>>.
- [3] Kratochvíl, B., Švorčík, V., Vojtěch, D.: Úvod do studia materiálů. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [4] JANČÁŘ, J.: Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. 1. vyd. Brno: VUT, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [5] Skripta.ft.tul.cz [online]. [cit. 10.2.2011]. Textilní kompozity. Dostupné na internetu: <<https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2006-03-16/12-54-35.pdf>>
- [6] Korinek [online]. [cit. 9.2.2011]. Kompozity. Dostupné na internetu: <<http://www.volny.cz/zkorinek/>>
- [7] IMaterialy [online]. [cit. 9.2.2011]. Polymerní vláknové kompozity. Dostupné na internetu: <http://www.imaterialy.cz/clanky/plasty-pro-architekturu-astavebnictvi-6-recyklace-plastu/2967/plasty-pro-stavebnictvi-a-architekturu-7-polymernivlaknove-kompozity>
- [8] Kolektiv autorů: STRUTEX. 1. vyd. Liberec: TU, 2008. ISBN 978-80-7372-418-4
- [9] Militký, J.: Přednášky: Textilní vlákna; Speciální vlákna. Liberec: TU 2005. 423s.
- [10] Gurit [online]. [cit. 15.2.2011]. Dostupné na internetu: <<http://www.gurit.com/>>
- [11] Bareš R. A.: Kompozitní materiály, SNTL Praha, 1988
- [12] Agarwal, B. D., Broutman, L. J.: Vláknové kompozity, SNTL Praha 1987
- [13] Basaltex [online]. 2004 [cit. 15.2.2011]. Zpracování nekonečných čedičových vláken do technických výrobků. Dostupné na internetu: <<http://www.basaltex.cz/>>.



- [14] Kunteová, P.: Dynamicko-Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s pletenou čedičovou a skleněnou výztuží. Liberec: Diplomová práce, 2009
- [15] Menšíková, P.: Chemická odolnost skleněných a čedičových vláken. Liberec: Diplomová práce, 2008.
- [16] Petrografie [online]. [cit. 3.2.2011]. Bazalt (čedič). Dostupné na internetu: <<http://petrol.sci.muni.cz/poznavanihornin/magmatity/bazalt.htm>>.
- [17] Lexis [online]. [cit. 28.1.2011]. Method for manufacturing basalt fiber. Dostupné na internetu: <[http://v3.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument;jsessionid=F2481A4CDBE90E37EFE947A86511332A.espacenet\\_levelx\\_prod\\_2?FT=D&date=20070104&DB=&locale=&CC=US&NR=2007000721A1&KC=A1](http://v3.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument;jsessionid=F2481A4CDBE90E37EFE947A86511332A.espacenet_levelx_prod_2?FT=D&date=20070104&DB=&locale=&CC=US&NR=2007000721A1&KC=A1)>.
- [18] Institut geologického inženýrství [online]. [cit. 28.1.2011]. Tavené horniny. Dostupné na internetu: <[http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/tavene\\_horniny.html#pojmy](http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/tavene_horniny.html#pojmy)>
- [19] Möbius, J.: Dynamicko - mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s krátkovlákným čedičem. Liberec: Bakalářská práce, 2010.
- [20] Lehner, J.: Skleněná, horninová a strusková vlákna, SNTL Praha 1960
- [21] Lučební závody a.s. Kolín [online]. [cit. 8.3.2011]. Lukosil M 130. Dostupné na internetu: <[http://www.lucebni.cz/main.php?action=docs&got\\_id=1&name=T](http://www.lucebni.cz/main.php?action=docs&got_id=1&name=T)>
- [22] Odetka a.s. [online]. [cit. 8.3.2011]. Křehkost vlákna. Dostupné na internetu: <[http://www.odetka.cz/net20/cz/hitech\\_snury\\_specmat\\_basalt.aspx](http://www.odetka.cz/net20/cz/hitech_snury_specmat_basalt.aspx)>
- [23] Skripta.ft.tul.cz [online]. [cit. 1.10.2010]. Synergický efekt. Dostupné na internetu: <<https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2007-11-21/08-48-11.pdf>>
- [24] Ashby, M. F.: Materials Selection in Mechanical Design. 3. vyd. Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0-7506-6168-2

## **6. Seznam příloh**

Příloha č. 1: CD s naměřenými hodnotami, grafy, obrázky, fotografie z rastrovacího fotonového mikroskopu